

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLÁN

CAMPO 1

USO DE OXÍGENO PURO PARA ACELERAR LA REACCIÓN DE FORMACIÓN DE SULFATO DE COBRE EN UN REACTOR INDUSTRIAL

TESIS QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO QUÍMICO

PRESENTA EL PASANTE
CARLOS CORTÉS FRAGOSO

ASESOR
DR. RICARDO PARAMONT HERNÁNDEZ GARCÍA

CUAUTITLAN IZCALLI

MARZO DE 2008



Universidad Nacional
Autónoma de México



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.



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLAN
UNIDAD DE LA ADMINISTRACION ESCOLAR
DEPARTAMENTO DE EXAMENES PROFESIONALES**

ASUNTO: VOTOS APROBATORIOS

FACULTAD DE ESTUDIOS
SUPERIORES CUAUTITLAN



DEPARTAMENTO DE
EXAMENES PROFESIONALES

**DRA. SUEMI RODRIGUEZ ROMO
DIRECTOR DE LA FES CUAUTITLAN
PRESENTE**

**ATN: L. A. ARACELI HERRERA HERNANDEZ
Jefe del Departamento de Exámenes
Profesionales de la FES Cuautitlán**

Con base en el art. 28 del Reglamento General de Exámenes, nos permitimos comunicar a usted que revisamos la Tesis :

"Uso de Oxígeno Puro para Acelerar la Reacción de Formación de Sulfato de Cobre en un Reactor Industrial".

que presenta el pasante: Carlos Cortés Fragoso.
con número de cuenta: 8608813-8 para obtener el título de :
Ingeniero Químico.

Considerando que dicho trabajo reúne los requisitos necesarios para ser discutido en el EXAMEN PROFESIONAL correspondiente, otorgamos nuestro VOTO APROBATORIO.

**ATENTAMENTE
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"**

Cuautitlán Izcalli, Méx. a 4 de Diciembre de 2007.

PRESIDENTE L. Q. Gloria Borjón Apan Ruiz

VOCAL L. Q. Guadalupe Franco Rodríguez.

SECRETARIO Dr. Ricardo Paramont Hernández García

PRIMER SUPLENTE MC. Ofelia Vega Vázquez.

SEGUNDO SUPLENTE MC. Gilberto Atilano Amaya Ventura

AGRADECIMIENTOS

Quiero comenzar por agradecer a esta increíble institución, la UNAM. No solo fue mi escuela, fue mi segunda casa.

A los 17's de IQ, vaya que disfruté de su compañía y amistad. Beto, Felipe, Helen, Javier, Juan, Lalo, Mario, Polo y Vero. Una "Goya" para ustedes.

Al Dr. Ricardo Páramont Hernández, gracias por tu asesoría, todo tú apoyo a larga distancia y por creer en mí para culminar éste proyecto.

Papá, por esa buena infancia, como me divertí.

Mario, Gibrán y Aldo. ¿Primos? Hermanos, siempre juntos.

Tía Zenaida, sin tu compañía y tu familia, no habiéramos sido esta gran familia.

Eduardo, sin un guía como tu, mi camino hubiera sido muy escabroso. Créelo.

A mi hermana, una mujer de gran corazón, que me enseñó junto con Luis, lo que es dedicación.

Bro', al último que le escribo, aunque no estás al final. Y aunque lejos, en ese viaje con África, sabes que estás muy cerca.

Mamá, trataré de resumirlo todo en estás líneas, ya que además de la vida, con lo cual hubiera sido más que suficiente, me diste más, me diste un futuro. Gracias Mamá. Te quiero mucho.

Finalmente, quiero decir que hoy cierro una etapa que estaba inconclusa en mi vida y que por algún momento pensé nunca cerrar, pero gracias a ti Mary, que con tu chispa y amor, me diste fuerza para iniciar y terminar (ya podemos quitar esos cuadernos). Pero esto es solo un escalón más de todos los que nos falta subir. Tú eres mi Guadalajara, mi Monterrey, mi todo junto, eres mi vida. Y nuestros sueños, Camila y Ricardo, quienes fueron la bendición que nos enseñó que podemos ser y hacer mucho juntos.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	3
OBJETIVOS	4
CAPÍTULO 1. EL SULFATO DE COBRE	5
<ul style="list-style-type: none">• Generalidades• Propiedades físicas y químicas	
CAPITULO 2. PROCESO DE SULFATO DE COBRE	12
<ul style="list-style-type: none">• Generalidades de la reacción• Características de la materia prima• Monitoreo de la reacción• Cristalización• Centrifugado• Secado y envasado	
CAPITULO 3. ENRIQUECIMIENTO DE OXIGENO EN LA REACCIÓN DE SULFATO DE COBRE	18
<ul style="list-style-type: none">• Generalidad• Características del oxígeno• Equipo• Instalación• Prueba de equipo• Condiciones de operación	

CAPITULO 4. RESULTADOS	28
<ul style="list-style-type: none">• Resultados de la reacción sin oxígeno• Resultados de la reacción con oxígeno	
CAPITULO 5. ANALISIS DE RESULTADOS	34
CONCLUSIONES	40
APENDICES	41
BIBLIOGRAFIA	48

INTRODUCCIÓN

A lo largo de la carrera de ingeniería química, me inculcaron la idea de crear y transformar los procesos químicos con el fin de facilitar la operación diaria de la industria. Como parte de esta necesidad de desarrollar y mejorar las aplicaciones, surgió la opción de hacer más eficiente el proceso de producción de sulfato de cobre (CuSO_4).

El problema principal que presenta este proceso, es que la reacción se lleva a cabo en un tiempo extremadamente largo, lo cual hace que sea muy ineficiente y que por ende se desencadenen problemas. Como un claro ejemplo de ello, se presenta, que es muy común, cuando no se puede cubrir la demanda de producto que pide el mercado. Entre otros problemas tenemos, la limitación de crecimiento por falta de espacio para instalar equipo nuevo adicional, altos consumos de energía, mano de obra, solo por mencionar los más relevantes.

Pero para comprender mejor el entorno del proceso, se dividió la tesis en varios capítulos. En el primer capítulo se empieza por revisar las características fisicoquímicas del sulfato de cobre, así como la importancia que tiene en el mercado.

En el siguiente capítulo, se revisa el proceso de sulfato de cobre tradicional, del cual surgió este proyecto.

En el capítulo tres, se habla del proceso de inyección de oxígeno (O_2) y de la forma en que logra incrementar la eficiencia en el proceso de sulfato de cobre. Adicionalmente, se hace referencia a las condiciones de seguridad y uso del oxígeno. Una vez comprendida y dimensionada la aplicación de oxígeno, se procede a realizar el arranque y control.

En el capítulo cuatro se muestran los datos tabulados obtenidos en el proceso tradicional y en el proceso enriquecido con oxígeno.

En el capítulo cinco, se lleva a cabo un análisis de los resultados para ambos procesos.

Finalmente concluyo definiendo el mejor proceso a raíz del análisis comparativo de ambos.

OBJETIVOS

El objetivo principal de este trabajo es analizar las ventajas de la inyección de oxígeno en los reactores químicos para producir sulfato de cobre para un caso a nivel industrial.

Los objetivos secundarios están dirigidos a cumplir el objetivo principal, éstos son:

Describir el proceso industrial para la obtención del sulfato de cobre usando como suministro de oxígeno al aire.

Describir las instalaciones necesarias para inyectar oxígeno puro al proceso de producción del sulfato de cobre.

Mostrar los resultados de un caso real a nivel industrial (en el que yo he participado) en el que se substituyó el suministro de aire por oxígeno puro.

CAPÍTULO 1

EL SULFATO DE COBRE

Generalidades

El sulfato de cobre, CuSO_4 , es la más importante de las sales cúpricas, cristalizando como pentahidratado, $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, en cristales azules asimétricos.

El sulfato de cobre se prepara por varios procedimientos, pero el método industrial es por disolución del metal en ácido sulfúrico concentrado y caliente en presencia de aire y cristalizando la sal de su solución acuosa. Los restantes métodos son a menor escala, se hace gotear ácido sulfúrico diluido y caliente sobre cobre granulado en presencia de aire y tostando el sulfuro de modo que se convierta en sulfato que se lixivia (ver apéndice 6) con ácido sulfúrico diluido.

El uso del sulfato de cobre es muy diverso y se puede emplear en los sistemas de enfriamiento, diques de irrigación, albercas, lagos artificiales y en proporciones mínimas (1 a 2 partes por millón) se agrega al agua potable para destruir algas que se desarrollan en los depósitos y comunican al líquido olor y sabor desagradables. La aplicación anterior representa la tercera parte de la producción total. Los otros dos tercios de la producción se usa extensamente como fungicida.

Existen otras aplicaciones pero de menor importancia como son el recubrimiento metálico, la aportación de cobre en alimento para animales, micro nutriente en suelos y tratamiento de los productos del petróleo para la conversión de sulfuros como el H_2S y mercaptanos, ya que son altamente corrosivos para los equipos de las refinerías, así como altamente contaminantes en productos finales como la gasolina y el keroseno.

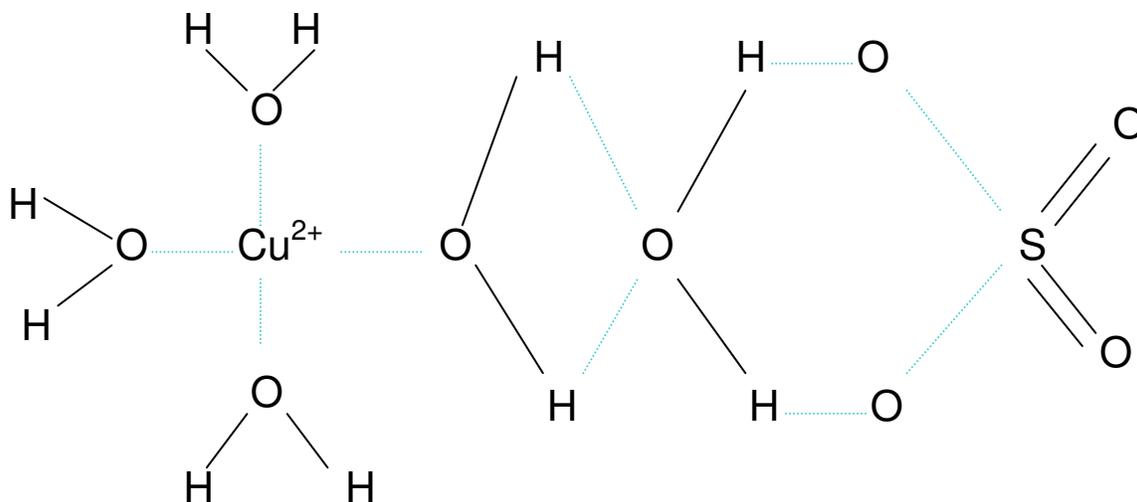
Además, el sulfato es empleado en la producción de colorantes y pinturas que contienen cobre, con el fin de proporcionar una mayor resistencia a la acción de la luz.

Propiedades físicas y químicas

El sulfato de cobre se le puede encontrar como sulfato de cobre anhidro, el cual es un polvo blanco verdoso formado por cristales rómbicos de peso molecular 159.61 gr/mol y gravedad específica de 3.606

El sulfato de cobre penta hidratado, es un cristal triclinico de color azul oscuro con peso molecular de 249.61 gr/mol, gravedad específica de 2.285, C_p 1126 J/kg °K. De las cinco

moléculas de agua que contiene, cuatro de ellas están unidas al ion Cu^{2+} y una quinta ligada al ion SO_4^{2-} , tal y como se muestra en la figura 1.1.



Molécula del sulfato de cobre penta hidratado
Figura 1.1

Al incrementar la temperatura cuatro de las cinco moléculas de agua que se encuentran unidas al ion Cu^{2+} , son fácilmente eliminables del compuesto por ser moléculas de agua de coordinación. Por ello se requiere de 88°C , para evaporar a las dos primeras y de 114°C para quitar dos de las tres moléculas restantes de agua. La quinta molécula de agua es la más complicada de eliminar, ya que se encuentra unida al sulfato por atracción ión-dipolo (ver apéndice 6), por lo que es necesario adicionar mayor energía para romper esa atracción, incrementando la temperatura hasta 245°C . Para comprender de mejor manera lo comentado, se pueden ver las siguientes reacciones:

@ 88°C



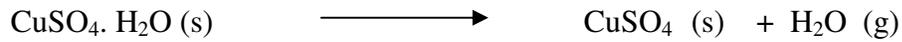
Reacción 1.1

@ 114°C



Reacción 1.2

@ 245° C

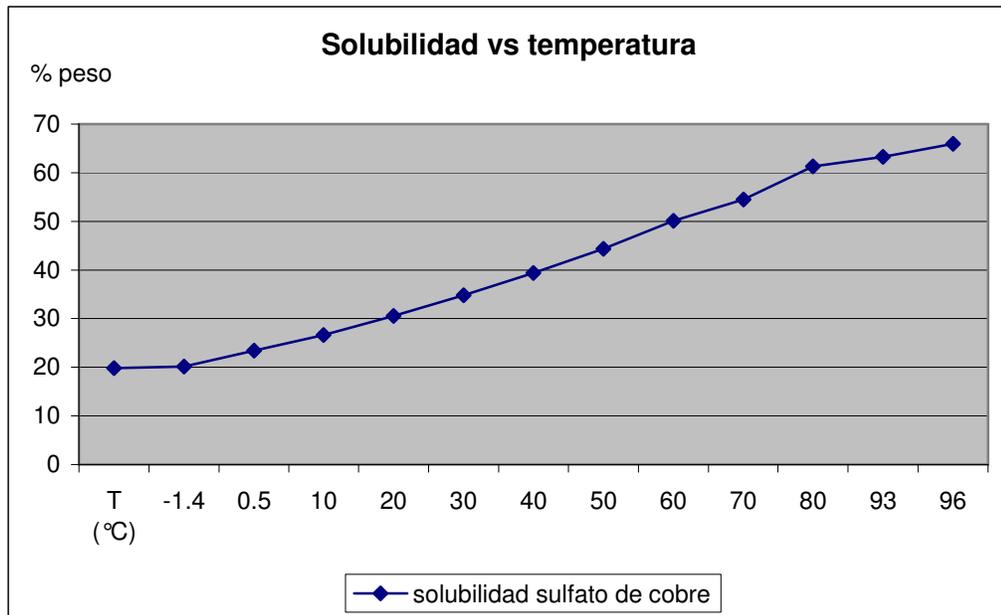


Reacción 1.3

Otra característica del sulfato de cobre es su solubilidad. A continuación se muestra la tabla 1.1 y la gráfica 1.1, donde se aprecia la solubilidad del sulfato de cobre en relación con la temperatura.

Tabla 1.1

T (°C)	-1.4	0.5	10	20	30	40	50	60	70	80	93	96	100
Solubilidad (% peso)	19.85	20.15	23.4	26.6	30.55	34.78	39.4	44.36	50.13	54.52	61.3	63.25	65.92

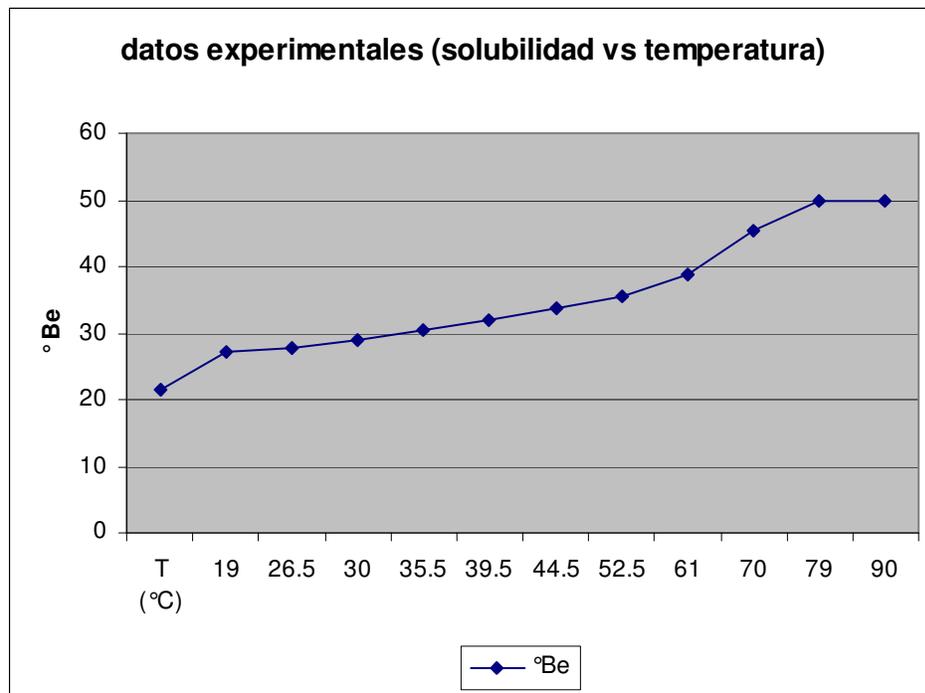


Gráfica 1.1
Solubilidad y temperatura

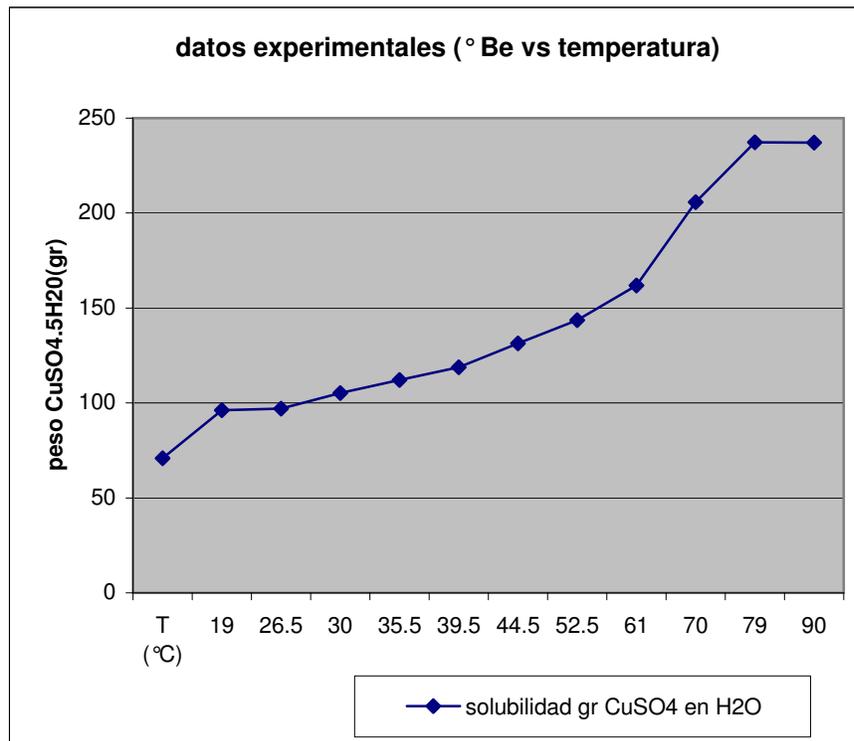
Para corroborar la información, se anexa la tabla 1.2 y las gráficas 1.2 y 1.3, donde se mide la solubilidad del sulfato de cobre pentahidratado en agua, empleado °Be (grados Baumé, los cuales se emplean para medir la concentración de líquidos con densidad relativa mayor a uno, como el ácido sulfúrico).

Tabla 1.2

T (°C)	19	26.5	30	35.5	39.5	44.5	52.5	61	70	79	90	95
°Be	21.5	27.2	27.7	29	30.4	31.8	33.7	35.6	38.7	45.3	50	50
gr CuSO ₄ .5 H ₂ O/lt H ₂ O	70.8	96.1	97.1	105.3	112.1	118.8	131.3	143.6	161.8	205.8	237.3	237.1

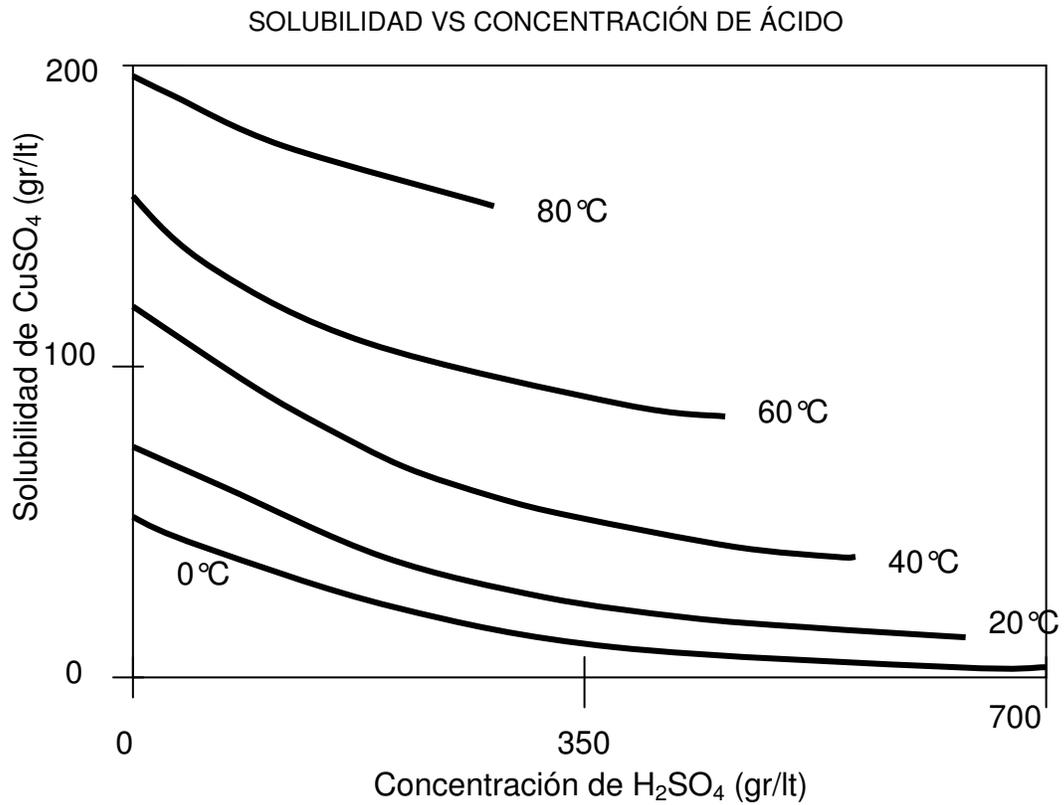


Gráfica 1.2
Solubilidad vs temperatura



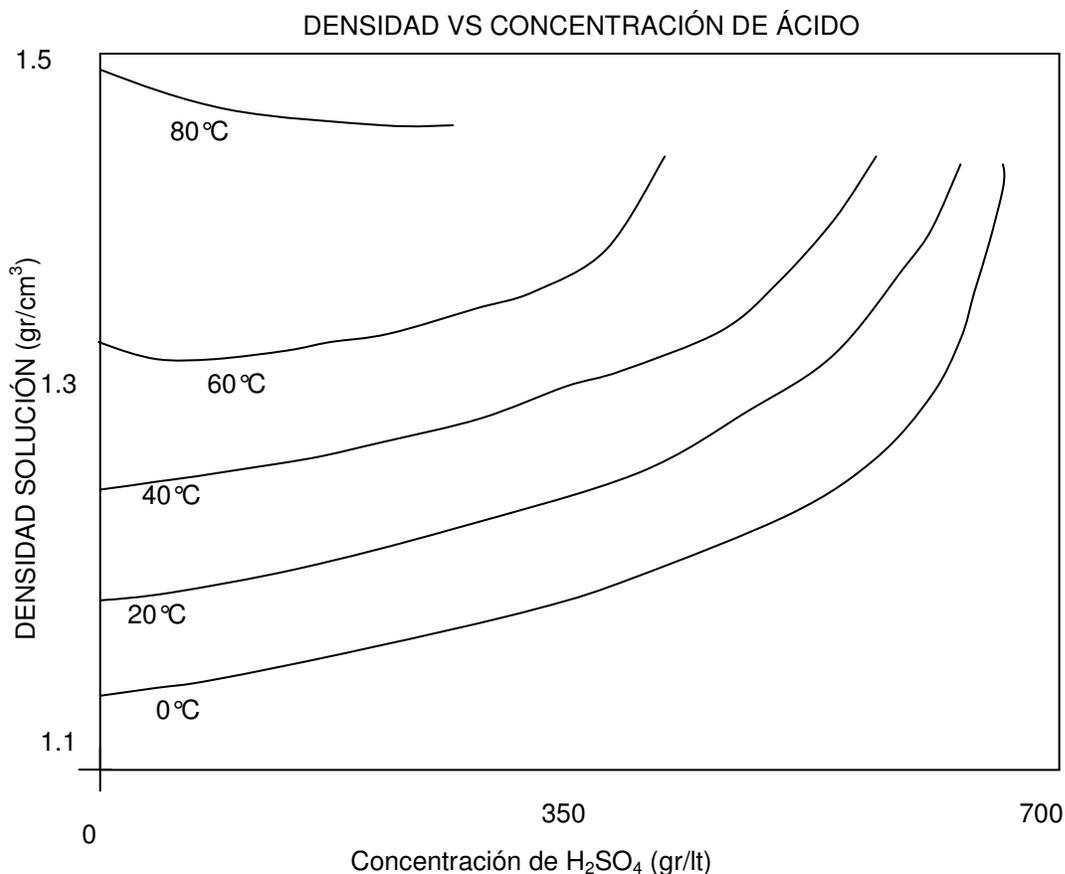
Gráfica 1.3
 Datos experimentales (° Be vs temperatura)

A continuación se presentan dos gráficas, la 1.4 y la 1.5, que harán referencia a la relación existente de la solubilidad en función de la temperatura y la concentración del ácido sulfúrico, así como la relación de la densidad en función de la temperatura y la concentración del ácido sulfúrico.



Gráfica 1.4
SOLUBILIDAD VS CONCENTRACIÓN DE ÁCIDO

Como se puede apreciar en la gráfica 1.4, a mayor concentración de ácido sulfúrico en la solución, disminuye la solubilidad del sulfato de cobre y por ende precipita, debido al efecto de ion común. Este incremento en la concentración del ácido, provoca que los cristales del sulfato de cobre vean incrementado su tamaño. Que en caso contrario, si no se adiciona ácido sulfúrico, los cristales formados serán más finos.



Gráfica 1.5
DENSIDAD VS CONCENTRACIÓN DE ÁCIDO

La gráfica 1.5, nos da una buena referencia de lo que ocurre dentro de un reactor (ver capítulo 2), esto ayuda a que se pueda tener mayor concentración de sulfato de cobre y aprovechar la misma reacción para incrementar el rendimiento a una temperatura de 80 °C.

El tipo de cristal que se desee obtener al final de un proceso, dependerá de la demanda del mercado. Ya sea concentrando las aguas madre para obtener mayor producto con cristales finos o incrementando la concentración del ácido sulfúrico para precipitar al sulfato, obteniendo cristales de mayor tamaño.

CAPÍTULO 2 PROCESO DE SULFATO DE COBRE

Generalidades de la reacción

El sulfato de cobre es producido al colocar en un reactor hecho de resina epóxica:

- cobre metálico (chatarra)
- ácido sulfúrico
- agua
- aire.

Debido a que fuera del aire todos los demás productos son colocados al inicio, el proceso es considerado *batch*.

Para comprender mejor el proceso de la reacción, les puedo comentar que el cobre no reacciona espontáneamente con los ácidos de acuerdo a la siguiente reacción:

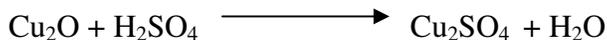


Reacción 2.1

La razón es que la reacción es endotérmica; pero si existe oxígeno presente, la reacción es espontánea (reacción 2.5):



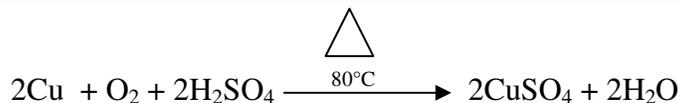
Reacción 2.2



Reacción 2.3



Reacción 2.4



Reacción 2.5

De ahí la importancia de emplear la estequiometría de reacción. Aunado a estos reactivos (Cu, H₂SO₄ y aire), es empleado vapor de agua, el cual tiene dos fines, el primero, generar calor a la reacción, lo cual aumenta la reacción del cobre metálico provocando la generación de óxido cuproso (reacción 2.2) y con el excedente de ácido sulfúrico se favorece la generación de más iones cuprosos (sulfato cuproso, reacción 2.3) y para la última parte de la reacción el exceso de aire (oxígeno) favorece la formación de sulfato de cobre (reacción 2.4).

El otro fin del incremento de temperatura es mantener en solución al sulfato de cobre generado en la reacción. Ya que por debajo de 80° C comienza a cristalizarse y eso provocaría problemas en el reactor, adhiriéndose el sulfato de cobre a las paredes y provocando serios problemas al momento de transvasar la solución resultante a los cristalizadores.

La reacción continuará hasta que se logre el equilibrio en el reactor (reacción 2.5).

Características de la materia prima

Cobre

El cobre metálico es la materia prima principal del proceso y también la más cara. De ahí que se emplee lo más económico del mercado, la chatarra.

Actualmente se cataloga como cobre de primera y cobre de segunda. El cobre de primera es aquél que se encuentra limpio y básicamente son rollos de cable eléctrico y tubería. El cobre de segunda, es aquél que viene contaminado por grasa u otros productos, como el magnesio, aluminio y fierro. Siendo éste último el que más daño le causa, ya que se mantiene como impureza hasta el producto final.

Aquel cobre que viene cubierto por una capa de barniz o recubierto por material plástico. Es separado para ser llevado a hornos, donde durante 5 horas es quemado, con el fin de eliminar estas impurezas, permitiendo que la reacción sea más eficiente.

Ácido sulfúrico

El ácido es una de las sustancias más empleadas a nivel mundial en muchos procesos y uno de ellos es éste, el proceso de sulfato de cobre.

En este proceso a la solución acuosa del mismo se le conoce como aguas madres, la cual es una solución de 10 a 20% volumen ácido sulfúrico en agua tomada de los cristalizadores, donde ya se precipitó el sulfato de cobre. Por ende, tiene una concentración pequeña de sulfato de cobre y de ácido sulfúrico, por lo que se le recupera ácido hasta alcanzar la concentración inicial de reacción. (Ver apéndice 2)

Aire

El aire como bien se ha comentado es fundamental para la reacción, ya que suministra el O₂ necesario para la misma, siendo su composición de 21% O₂ y 79% N₂. Éste es suministrado a 20 psig (lb/plg²).

Vapor

Por su parte el vapor, agente que proporciona la temperatura, es suministrado a 30 psig y con esto logra mantener la temperatura a 80°C.

Monitoreo de la reacción

Una vez que la chatarra de cobre fue seleccionada, se pesa y alimenta al reactor (fig. 1) por la parte superior hasta tener una cama que cubre dos terceras partes del volumen total del reactor. Posteriormente se agregan las aguas madres y H_2SO_4 hasta cubrir en su totalidad la cama de cobre y se inicia la inyección de aire y vapor de agua.

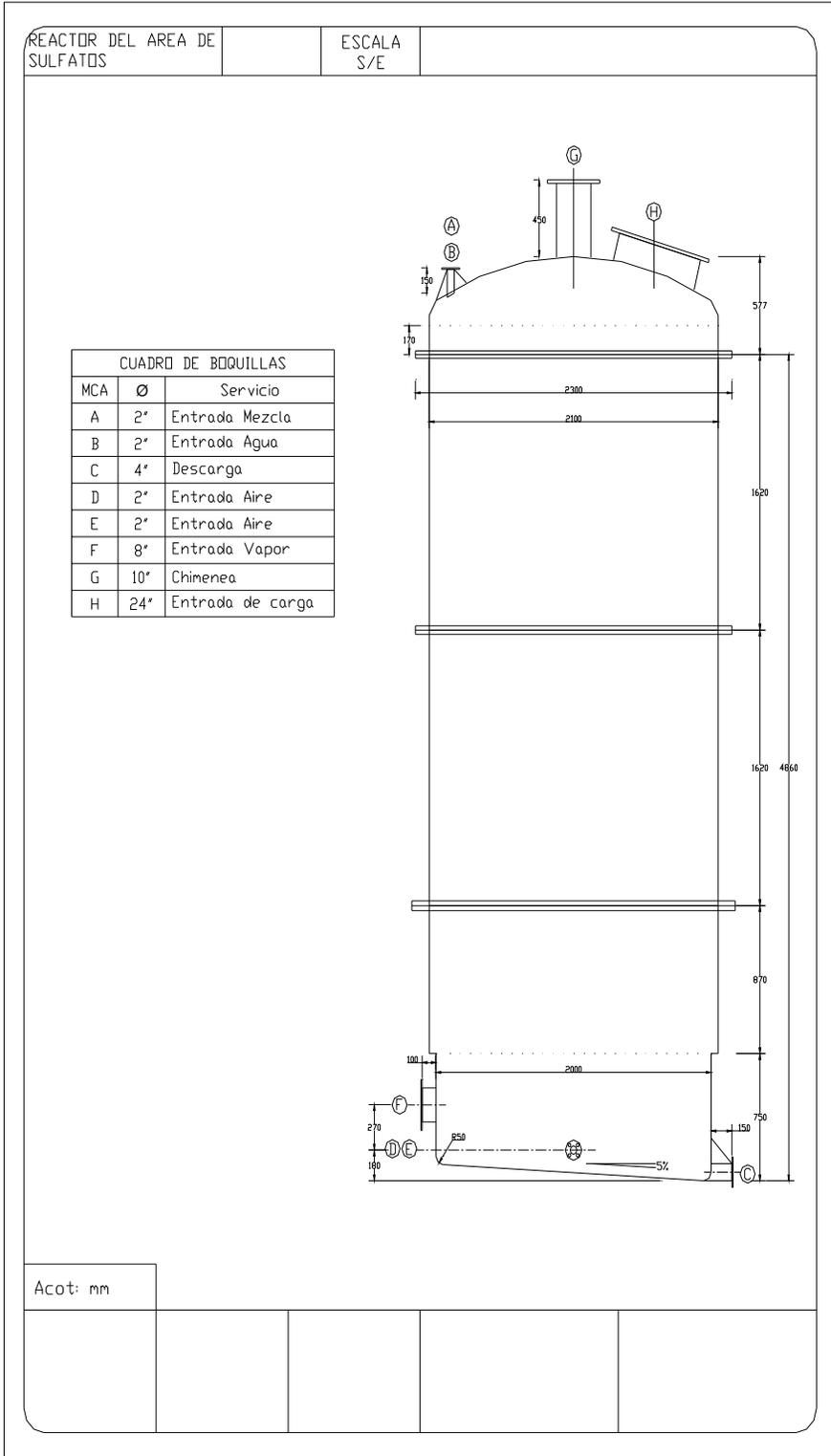


Figura 2.1
Reactor de sulfato de cobre

La reacción es monitoreada desde la hora cero y hasta el final de la misma, analizando las siguientes variables:

- Acidez de la solución
- Volumen de NaOH consumido en la titulación
- Densidad de la solución de CuSO₄ (° Be)
- Presión del aire
- Temperatura
- Cantidad de Cu

A continuación se muestra la tabla de control:

Tabla 2.1
Tabla de control de datos

Hora	Acidez	Vol. NaOH	°Be	°C	Observaciones

Dos parámetros que nos dan control sobre la reacción de formación de sulfato de cobre son la acidez y el volumen de sosa. -Aunque en realidad con el volumen de sosa es suficiente, ya que la acidez se determina a partir del primero-. La forma de cuantificarlos es a través de una titulación con sosa, la cual indica como va disminuyendo la concentración del ácido sulfúrico en la solución de reacción del reactor. Esta última se da por terminada, cuando ya no tenemos más ácido sulfúrico en el reactor, lo cual queda cuantificado al momento de agregar la primera gota de sosa en la muestra a titular y la fenoftaleina cambia de color. Se debe tener cuidado de que estos valores siempre lleguen a cero, ya que de lo contrario en el

proceso de secado, el sulfato de cobre pentahidratado se apelmazará y por el exceso de secado puede terminar siendo sulfato de cobre anhidro (por su color blanco).

Los grados Baumé, expresan la densidad del sulfato de cobre en solución y es un valor que se va incrementado con el paso de la reacción. Nunca inicia en el valor del ácido sulfúrico, ya que las aguas madres tienen un residual de sulfato de cobre.

La cantidad de aire, es controlada por la presión de inyección de los sopladores.

La temperatura es controlada por la cantidad de vapor inyectado.

El nivel de cobre en el reactor se fija de forma visual y se debe tener cuidado cuando se maneje cobre de segunda, ya que al ser más delgado y contener más impurezas, se consume rápidamente, en comparación con el cobre de primera que se consume más lentamente.

Cristalización

Una vez determinado que no se tiene presencia de ácido sulfúrico en el reactor, a través del seguimiento con titulaciones de neutralización empleando sosa, el producto es bombeado a unos cristalizadores atmosféricos, no sin antes pasarlo por unos filtros prensa para eliminar las impurezas insolubles. Ya en los cristalizadores, la solución se deja reposar a temperatura ambiente durante tres o cuatro días, lo cual provoca que los cristales inicien la nucleación y se formen en el fondo y en las paredes del cristalizador, dando como resultando unos cristales gruesos.

Se puede acelerar la precipitación del sulfato de cobre sin afectar el tamaño del cristal si se colocan bastones de plomo, a los cuales se les adhieren también los cristales.

Es importante mantener separados los cristales obtenidos en la parte baja de la pared y bastones, ya que estos cristales son de una pureza menor, debido a que es donde se sedimentan las otras impurezas.

Si se desea obtener un tamaño de cristal más fino, éste se puede lograr enfriando súbitamente la solución o agitando la solución para acelerar la velocidad de enfriamiento.

La solución residual que se obtiene, son las aguas madres que son reenviadas al reactor o a los tanques de almacenamiento.

Centrifugado

En este punto los cristales son lavados con agua con el fin de quitarles impurezas y un poco de acidez. El agua recolectada es empleada para rellenar reactores. Posteriormente la carga de sulfato de cobre es metida a la centrifuga, de donde sale con 1% de humedad.

Secado y envasado

Al entrar al secador rotatorio es alimentado junto con una corriente de aire caliente en paralelo, lo cual evita que se deshidrate más de la cuenta y se convierta en anhidro.

Finalmente, el sulfato de cobre pentahidratado es envasado en costales para su venta

CAPITULO 3

EQUIPO E INSTALACIÓN PARA INYECCIÓN DE OXÍGENO

Generalidades

Como se comentó en el capítulo anterior, el oxígeno en el aire es fundamental en la reacción para generar al sulfato de cobre. Siendo éste introducido con ayuda de un soplador. Esto hace que la reacción se vuelva muy ineficiente, ya que están siendo inyectados a su vez volúmenes grandes de nitrógeno, para ser más exactos 79 partes en volumen de nitrógeno por 21 de aire, reflejándose esta ineficiencia en los largos tiempos de reacción.

De esa ineficiencia surge este proyecto de mejora, el cual implica el enriquecimiento del aire con oxígeno puro, el cual es obtenido de un proceso de separación del aire y es almacenado en tanques termo como líquido criogénico.

En este capítulo analizaremos las características del oxígeno y la forma en que enriquece al aire.

Características del oxígeno

En el proceso tenemos al oxígeno en dos estados, el gaseoso y el líquido, éste último considerado producto criogénico por encontrarse por debajo de los -100 °C, exactamente -186 °C.

Tabla 3.1
Características del oxígeno gaseoso

Estado	Gas
Fórmula	O ₂
Pureza	>99%
Color	Ninguno
Olor	Ninguno
Sabor	Ninguno
Si es inhalado	Respirar más de 80% de oxígeno a presión atmosférica por más de unas cuantas horas, puede causar tos, dolor de garganta y pecho, dificultades para respirar. Respirarlo a una presión alta puede causar daño en los pulmones y daño en el sistema nervioso central
Limite de inflamabilidad	No inflamable
Agente oxidante	Altamente
Riesgos de fuego y explosión	Acelera la combustión y al contacto con materiales inflamables puede causar fuego o explosión
Estabilidad	Estable
Incompatibilidad	Materiales combustibles, asfaltos, hidrocarburos especialmente en grasas
Equipo de seguridad	Guantes, lentes
Número de la ONU	1072
Clasificación NFPA	Ver figura 3.1/Apendice1

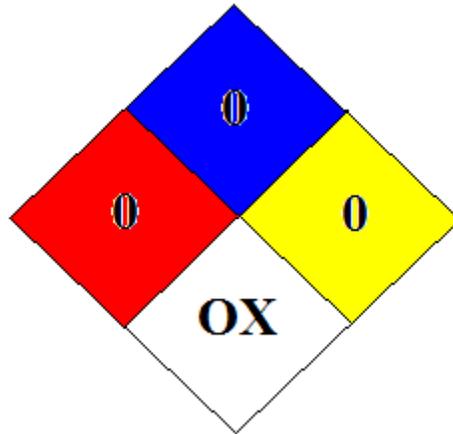


Figura 3.1
Rombo NFPA para oxígeno gaseoso

Tabla 3.2
Características del oxígeno líquido

Estado	Líquido
Fórmula química	O ₂
Color	Azul pálido
Olor	Inodoro
Inflamabilidad	Ninguna, pero acelera vigorosamente la combustión
Riesgos para la salud	Puede causar congelación severa
Compatibilidad	En presencia de grasas y aceites, puede explotar con la ignición o el impacto
Índice de expansión para el líquido a gas (21.1° C)	1 a 860.5
Número de la ONU	1073
Clasificación de la NFPA	Ver figura 3.2/Ver apéndice 1

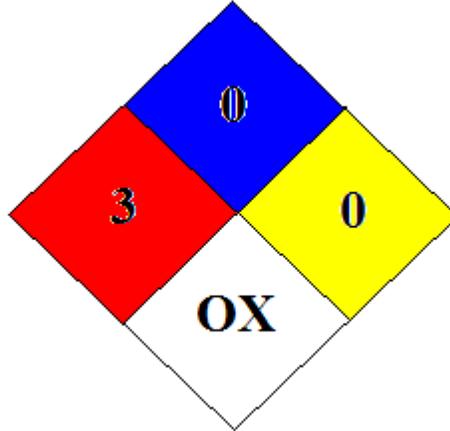


Figura 3.2

Rombo de la NFPA para oxígeno líquido

Equipo

Nota: El equipo antes de ser empleado debe ser limpiado con una solución especial (jabón cristal) para eliminar cualquier traza de grasa y evitar un riesgo de explosión.

Tanque termo

Los productos criogénicos son almacenados en tanques termo, los cuales son construidos para contener y mantener al oxígeno en estado líquido, siempre de manera segura para el personal y equipo (figura 3.3).

Antes de describir las características de uno de estos tanques, se hace referencia a una similitud. El tanque termo es como un termo para café, el fundamento principal en ambos es disminuir la transferencia de calor entre el medio ambiente y el producto que contienen. Así el oxígeno es conservado frío y en estado líquido y el café es conservado caliente, por mucho más tiempo de lo que un recipiente normal podría.

El tanque termo consta de un tanque interno construido en acero inoxidable e internamente pulido en acabado espejo, un tanque externo concéntrico construido en acero al carbón y entre ambos está un aislante y la generación de vacío.

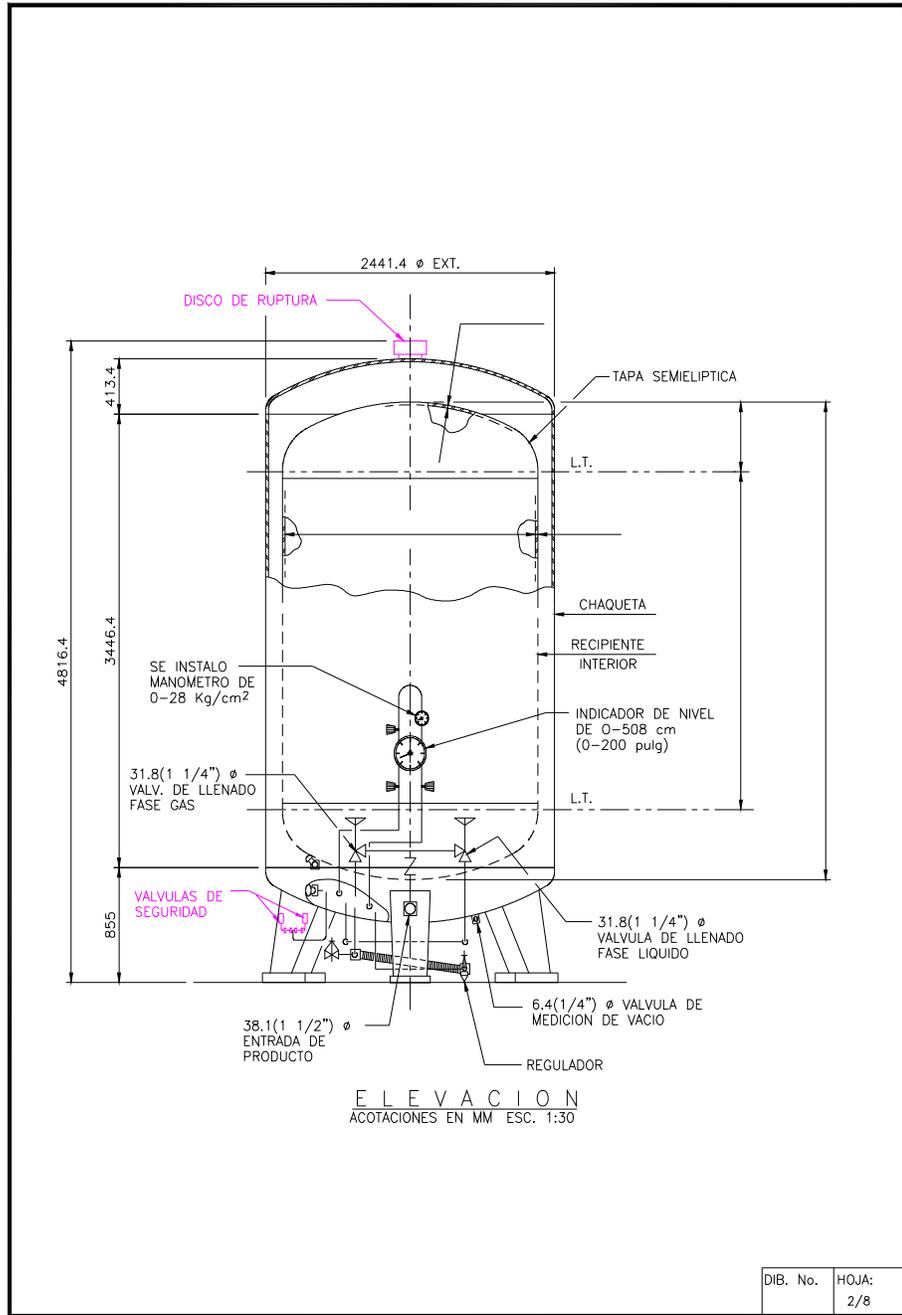


Figura 3.3
Diagrama tanque termo

Gasificador

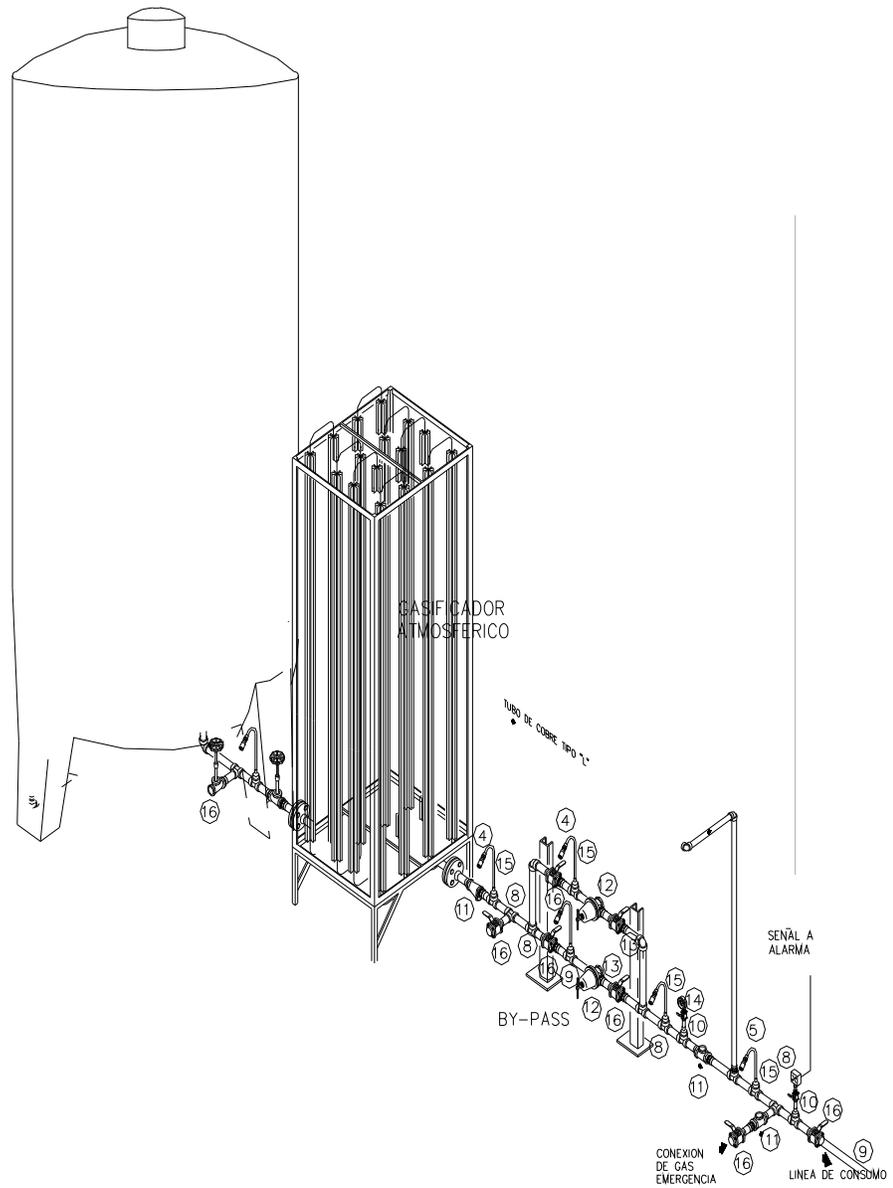


Figura 3.4
Diagrama tanque termo y vaporizador

El gasificador es fundamental para la aplicación, ya que será el que nos genere el flujo de oxígeno gas necesario para inyectarlo en el reactor. Éste debe ser construido en acero inoxidable o en monel (ver apéndice 6), ya que nos permiten manejar flujos altos de oxígeno, sin que la tubería se funda debido a la fricción que puede ocurrir en una tubería de acero al carbón.

Flujómetro

Nos ayuda a controlar la inyección de oxígeno y a generar la reacción en forma estequiométrica.

Bomba

La bomba es empleada en el sistema de recirculación para que a su descarga se inyecte el oxígeno. Esta bomba al igual que todos los equipos empleados en la reacción, deberán ser construidos con materiales que soporten el uso de oxígeno y ácido sulfúrico.

El material de esta bomba es PDVF (ver apéndice 6) y es ideal para sistemas de ácidos fuertes y temperaturas de 80 °C.

El uso de la bomba es simplemente para generar alta presión, lo cual ayuda a que el oxígeno se disuelva en la solución. Ya que a mayor presión la solubilidad del oxígeno se incrementa.

Vénturi

El venturi debido al principio por el que se rige, permite que pueda ser colocado a la descarga de la bomba y emplear el vacío que genera para inyectar al oxígeno. La turbulencia que genera entre la mezcla de la solución ácida y el oxígeno, permite que éste último se disuelva en la solución.

Eductor

El eductor emplea la energía cinética de un fluido para generar el movimiento de otro. Logrando que por cada volumen que sale, mezcle 4 volúmenes más. Una vez más lo que logramos con este equipo es disolución de oxígeno.

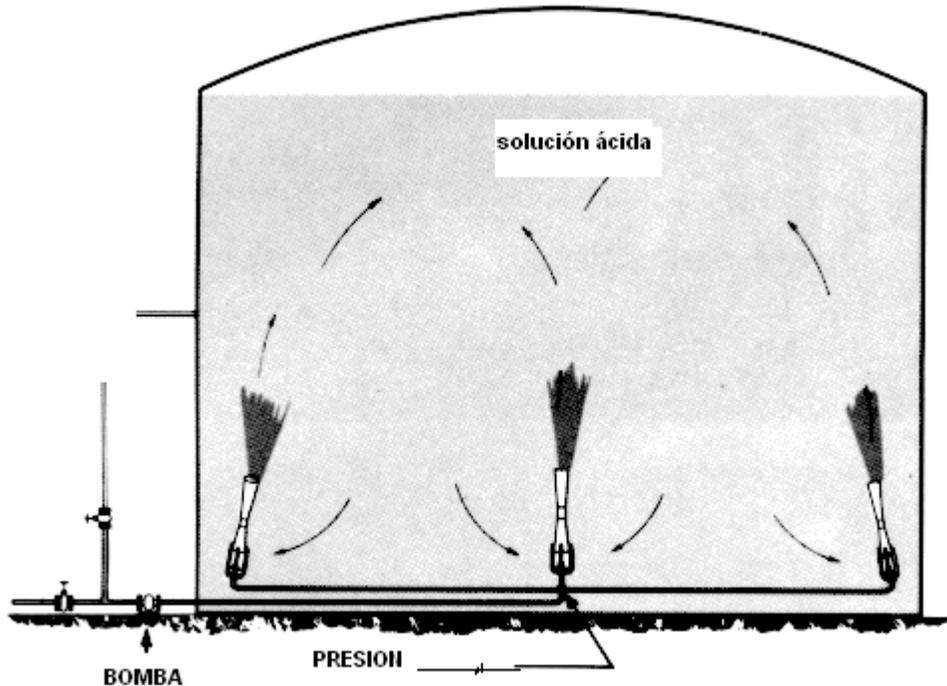


Figura 3.5
Funcionamiento de un eductor

Instalación

Primeramente el sistema de oxígeno (tanque termo, gasificador) debe encontrarse en un área con las siguientes características:

1. El área debe estar ventilada, para evitar acumulaciones de oxígeno por derrame y/o fuga.
2. Debe tener acceso para la descarga de producto
3. El tanque debe ser montado sobre una cimentación adecuada.
4. Todos los materiales y equipos deben estar libres de grasa para evitar explosiones, ya que reaccionan violentamente en presencia de oxígeno.
5. El área debe ser restringida.
6. No deben existir drenajes cercanos.
7. El piso alrededor del área deberá ser de concreto.

En el reactor es montado el sistema de oxígeno, que complementará la inyección del aire.

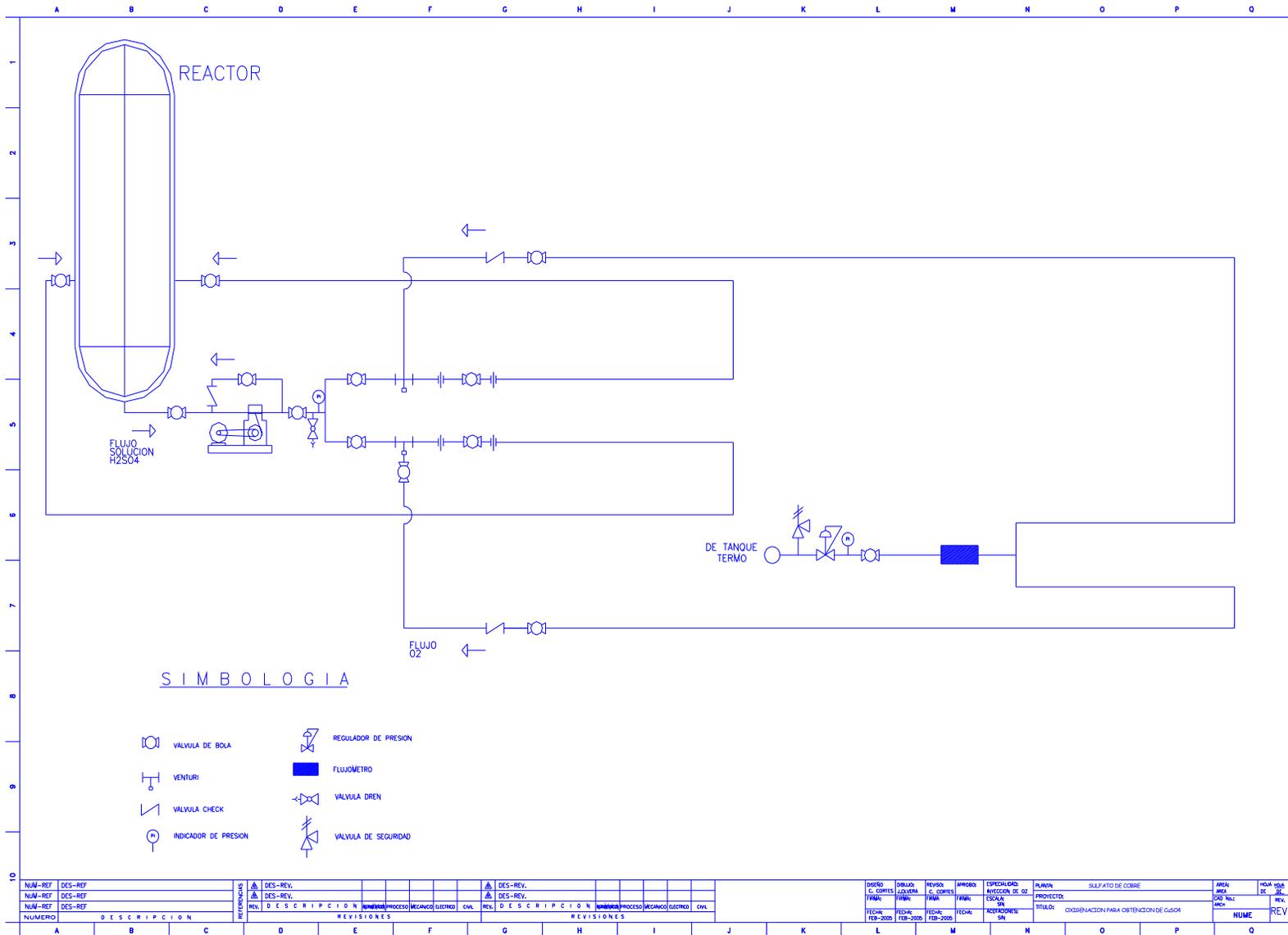


Figura 3.6*
DTI del proceso de oxigenación

*elaborado en autocad, por lo que la simbología puede cambiar

Para garantizar la calidad y la seguridad de la instalación, se procede a efectuar una prueba de hermeticidad con gas nitrógeno. En ella se procede a aplicar 1.5 veces la presión de operación del sistema, durante 2 hrs.

Operación de prueba

Una vez que la instalación de tanque, tubería y equipo fue aprobada, procedemos a arrancar el sistema para verificar su correcta operación.

Primeramente llenamos el tanque termo, purgándolo inicialmente hasta que la concentración de nitrógeno esté por debajo de las 10 ppm y la humedad esté por debajo de las 5 ppm.

Con tanque lleno, se procede efectuar la primera inyección de oxígeno a un reactor de sulfato de cobre funcionando normalmente.

1. Se procede a arrancar la bomba que recirculará la solución ácida del reactor a una presión de 200 psig
2. Se abre la válvula de la fase líquida del tanque termo y regulamos la presión del oxígeno
3. En seguida se ajusta el flujómetro
4. Se observa el sistema buscando alguna falla.
5. Y para garantizar que el oxígeno ha entrado al reactor, se detienen por un momento los sopladores de aire y se verifica visualmente por la tapa del reactor que exista agitación, eso confirmará el buen funcionamiento.
6. Por último se para el sistema de inyección y se arrancan los sopladores.

Con los pasos anteriores ya se pueden iniciar las pruebas para demostrar los beneficios de un enriquecimiento de oxígeno.

Para iniciar las pruebas se usan tres reactores, de los cuales se correrá primero con el método tradicional y posteriormente esos tres reactores serán enriquecidos con oxígeno.

Debe cuidarse lo siguiente para las pruebas con y sin oxígeno:

- Emplear el mismo tipo de cobre en las reacciones.
- Manejar la misma temperatura.

Condiciones de operación con oxígeno

Como verán, la idea principal de la instalación es la de poder incrementar la disolución de oxígeno, para lo cual empleamos dos variables:

- El incremento de presión en el sistema
- La turbulencia en el sistema para lograr agitación que conlleva mayor disolución.

La temperatura quedó fija debido a la importancia de mantener en disolución al sulfato de cobre mientras se genera. Pero podemos comentar que a menor temperatura, mayor disolución del oxígeno.

Con lo anterior las variables a controlar para la inyección de oxígeno serán el flujo y la presión.

Para el flujo se establece que se adicionará el 50% del consumo de oxígeno determinado en forma estequiométrica (reacción 2.5 y tabla 5.4), ya que sólo es enriquecimiento. Esto es $15.4 \text{ m}^3 \text{ O}_2/\text{hr}$ ó $20.4 \text{ kg O}_2/\text{hr}$ (ver apéndice 5). Tiempo de reacción 10.5 hrs

En el caso de la presión manejaremos una presión de 80 psig, pero la verdadera presión que nos dará la disolución será la descarga de la bomba la cual estará manejando 200 psig.

Al reactor se carga 1,700 kg Cu (tabla 5.5) y siempre se adiciona de H_2SO_4 a las aguas madres con el fin de favorecer la reacción hacia la producción de CuSO_4

CAPÍTULO 4 RESULTADOS

Tablas de resultados de las reacciones sin oxígeno

A continuación se muestran los resultados obtenidos en las reacciones que se llevaron a cabo de forma tradicional, inyectando solamente aire al reactor.

En las siguientes tablas el término acidez se refiere a la concentración de ácido sulfúrico en la solución. La concentración de sosa con la que se titula es la misma en todos los experimentos.

Tabla 1
Reacción 1 sin O₂

Hora	Acidez	Vol. NaOH	°Be	Observaciones
0	13.5	29	31	
1	13.12	28	30	
2	12.74	26	32	
3	11.76	24	34	
4	11.27	23	35	
5	9.8	20	36	
6	8.82	18	37	
7	7.84	16	37	
8	6.86	14	39	
9	6.35	13	40	
10	5.88	12	40	
11	5.39	11	41	
12	4.41	9	42	
13	3.92	8	43	
14	2.94	6	44	
15	1.96	4	46	
16	1.47	3	47	
17	0.98	2	48	
18	0.89	1	48	
19	0	0	48	

Tabla 2.
Reacción 2 sin O₂

Hora	Acidez	Vol. NaOH	°Be	Observaciones
0	14.7	30	31	
1	14.21	29	32	
2	12.25	25	33	
3	10.78	22	33	
4	9.6	20	34	
5	8.82	18	36	
6	8.51	17	36	
7	8.33	17	37	
8	7.84	16	38	
9	6.37	13	39	
10	5.88	12	40	
11	4.4	10	41	
12	3.92	8	42	
13	3.43	7	43	
14	2.94	6	44	
15	1.96	4	46	
16	0.49	1	47	
17	0.49	1	48	
18	0.25	0.5	48	
19	0	0	48	

Tabla 3.
Reacción 3 sin O₂

Hora	Acidez	Vol. NaOH	°Be	Observaciones
0	13.65	28	30	
1	12.94	26	31	
2	11.76	24	33	
3	11.27	23	34	
4	11.27	23	34	
5	10.98	22	35	
6	8.82	18	35	
7	8.33	17	36	
8	7.84	16	36	
9	7.35	15	37	
10	7.5	14	37	
11	6.86	14	38	
12	5.59	11	39	
13	4.9	10	41	
14	3.92	8	42	
15	2.94	6	43	
16	1.96	4	44	
17	0.68	2	45	
18	0.49	1	46	
19	0	0	47	

Tabla de resultados de la reacción con oxígeno

Las últimas tres tablas muestran los resultados obtenidos enriqueciendo la reacción con oxígeno

Tabla 4
Reacción 4 con O₂

Hora	Acidez	Vol. NaOH	°Be	Observaciones
0	15.9	32	27	
0.5	15.68	32	28	
1	15.19	31	29	
1.5	14.21	29	30	
2	13.23	27	30	
2.5	12.9	27	30	
3	12.28	26	31	
3.5	11.76	24	32	
4	10.79	22	34	
4.5	10.29	21	35	
5	8.82	18	36	
5.5	7.84	16	37	
6	6.86	14	38	
6.5	5.88	12	40	
7	4.41	9	41	
7.5	3.92	8	42	
8	2.94	6	44	
8.5	1.96	4	45	
9	0.98	2	46	
9.5	0.49	1	47	
10	0	0	48	

Tabla 5
Reacción 5 con O₂

Hora	Acidez	Vol. NaOH	°Be	Observaciones
0	14.3	29	30	
0.5	13.72	28	31	
1	13.72	28	31	
1.5	12.74	26	33	
2	11.76	24	34	
2.5	10.78	22	34	
3	10.78	22	35	
3.5	10.78	22	35	
4	10.29	21	36	
4.5	9.31	19	37	
5	8.33	17	38	
5.5	7.84	16	39	
6	7.84	16	40	
6.5	7.35	15	41	
7	5.88	12	42	
7.5	4.41	9	42	
8	3.92	8	44	
8.5	2.94	6	45	
9	2.45	5	46	
9.5	1.96	4	47	
10	1.47	3	48	
10.5	0.47	1	47	
11	0	0	48	

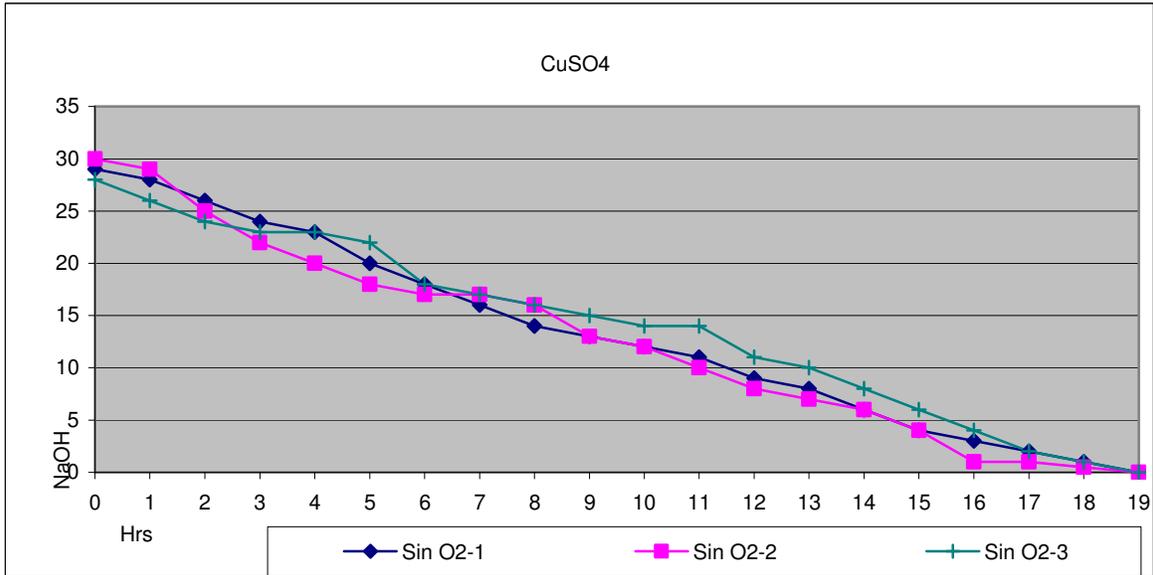
Tabla 6
Reacción 6 con O₂

Hora	Acidez	Vol. NaOH	°Be	Observaciones
0	14.7	30	31	
0.5	14.21	29	32	
1	12.74	26	33	
1.5	12.25	25	34	
2	11.76	24	34	
2.5	10.78	22	35	
3	10.29	21	36	
3.5	9.31	19	37	
4	8.82	18	38	
4.5	7.84	16	39	
5	7.35	15	40	
5.5	6.37	13	41	
6	5.39	11	42	
6.5	4.91	9	43	
7	4.41	9	44	
7.5	3.43	7	44	
8	2.94	6	45	
8.5	1.96	4	46	
9	1.4	4	47	
9.5	0.98	2	47	
10	0.48	1	48	
10.5	0	0	49	

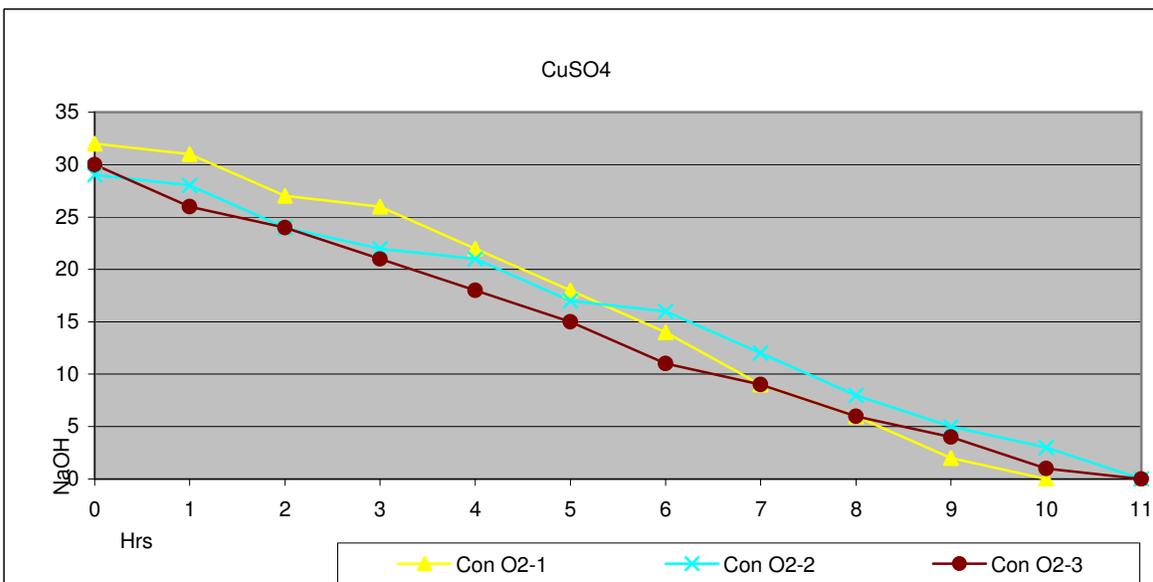
*Para fines prácticos el último valor, se graficó como la hora 11.

CAPÍTULO 5 ANÁLISIS DE RESULTADOS

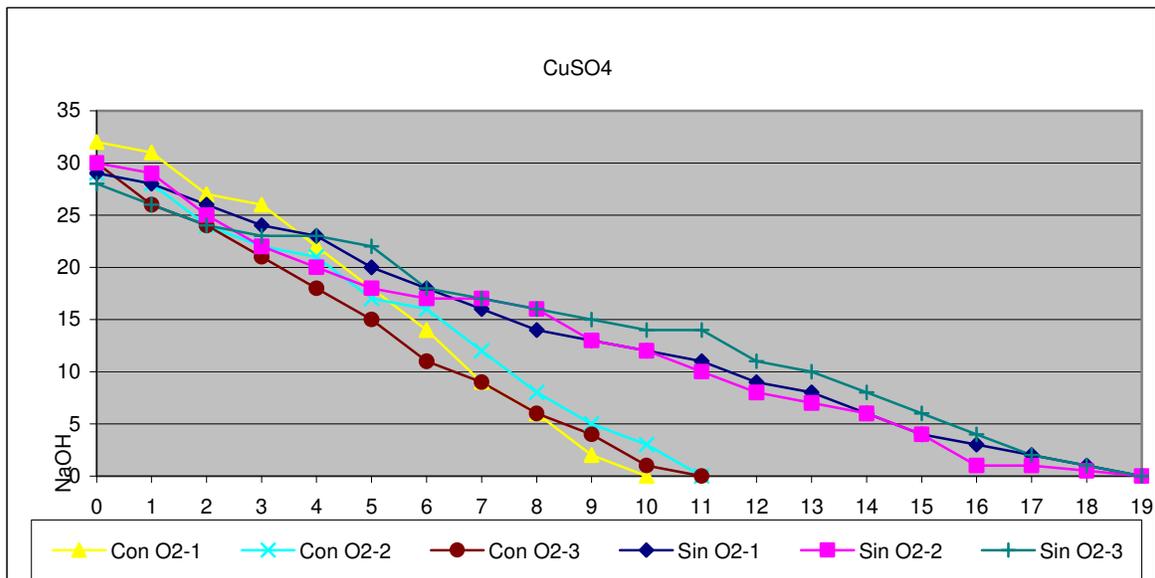
Una vez tabulados los datos de las reacciones sin oxígeno (tablas 4.1, 4.2 y 4.3), y los datos de las reacciones con oxígeno (tabla 4.4, 4.5 y 4.6). Procedemos a graficarlos para iniciar el proceso de análisis.



Gráfica 5.1
Reacciones sin O2



Gráfica 5.2
Reacciones con O2



Gráfica 5.3
Comparativo de las reacciones

Si se observa el comportamiento de las diferentes curvas de la gráfica 5.3, se puede ver inmediatamente el beneficio de enriquecer con oxígeno la reacción. Las reacciones que fueron enriquecidas con oxígeno llegan a su equilibrio en un tiempo menor, en comparación con las reacciones que no utilizaron oxígeno. Además de que iniciaron con concentraciones de ácido sulfúrico muy similares, lo cual se puede ver en el volumen de sosa requerido para la titulación.

Tabla 5.1
Tiempo de reacción

Reacción	Tiempo de reacción sin oxígeno (hrs)	Tiempo de reacción con oxígeno (hrs)
1	19	
2	19	
3	19	
1		10
2		11
3		10.5

Promediando el tiempo en cada bloque de reacciones tenemos:

Tabla 5.2
Tiempo promedio de reacción

Tiempo promedio de reacción sin oxígeno	Tiempo promedio de reacción con oxígeno
19 hrs	10.5 hrs

De acuerdo a la tabla 5.2 se logró reducir el tiempo de la reacción en un 55.26 %. En otras palabras se disminuyó el tiempo de operación 25.5 hrs.

Se podría pensar que el porcentaje en tiempo de reacción reducido es el mismo que el beneficio obtenido en incremento de producción, pero no es así, ya que la base a tomar no es la misma.

Para el análisis del incremento de la producción es considerada como base la producción original. Y para esto empezaremos con el análisis de la reacción:

Tabla 5.3
Pesos moleculares

ELEMENTO O COMPUESTO	PESO MOLECULAR *
Cu	63.5
O ₂	32
H ₂ SO ₄	98
CuSO ₄	159.5
H ₂ O	18

*Valores redondeados para fines prácticos

De acuerdo a la reacción 2.5,

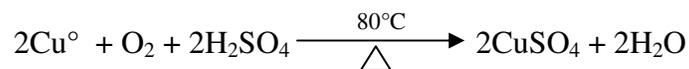


Tabla 5.4
Cantidades requeridas y obtenidas en la reacción

ELEMENTO O COMPUESTO	Cantidades estequiométricas (kg)
Cu	1,700
O ₂	428.3
H ₂ SO ₄	2623.6
CuSO ₄	4270.1
H ₂ O	240.9

Con la cantidad de cobre adicionada al reactor, 1,700 kg, el cual es nuestro reactivo limitante, tenemos que la cantidad de sulfato de cobre producido es de 4270.1 kg (teórico). En la realidad la eficiencia de reacción es del orden del 85 al 90%, por lo que al final determinaremos el beneficio real.

Soportados en la información obtenida y de acuerdo al tiempo consumido en las tres reacciones que se llevaron a cabo con oxígeno en un tiempo de 31.5 hr (tabla 5.6), más las 22.5 hr del tiempo ahorrado con respecto a las reacciones sin oxígeno (tabla 5.5), podemos considerar que de trabajar bajo este régimen de operación (oxigenación de reactores), podremos tener un incremento de producción del 80.96% en el mismo tiempo (57 hrs). Ver tabla 5.7

Tabla 5.5
Producción y productividad sin O₂

Reacción	T, hr	CuSO ₄ producido, kg	Kg CuSO ₄ /hr
1	19	4270.1	224.7
2	19	4270.1	224.7
3	19	4270.1	224.7
Total	57	12810.3	224.7

Tabla 5.6
Producción y productividad con O₂

Reacción	T, hr	CuSO ₄ producido, kg	Kg CuSO ₄ /hr
1	10	4270.1	427.0
2	11	4270.1	388.2
3	10.5	4270.1	406.7
Total	31.5	12810.3	407.3

Tabla 5.7

Comparación de la producción obtenida en el mismo tiempo (57 hrs), empleando oxígeno.

Reacción	T, hr	CuSO ₄ producido, kg
1	10.5	4270.1
2	10.5	4270.1
3	10.5	4270.1
4	10.5	4270.1
5	10.5	4270.1
0.42	4.5	1831.4
Total	57	23181.9

Para finalizar el análisis, tomamos en cuenta la eficiencia real de proceso como un promedio del rango 87.5%. Con lo que tenemos que el volumen de producción real obtenido, manejando la tabla 5.7, es de 20,292.9 kg CuSO₄.

La compañía tiene una demanda de producto mensual de 1,200 ton. Que con la capacidad tradicional no podía cubrir.

De acuerdo a la tabla 5.8, los 6 reactores producirán 849,444 kg/mes, quedando un déficit de producción de 350,556 kg. Los cuales eran comprados a la competencia, para a su vez revenderlo.

Tabla 5.8

Producción mensual de un reactor sin enriquecimiento, considerando la eficiencia real 87.5%

Cantidad de reactores	Producción CuSO ₄	tiempo
1	3736 kg	19 hrs
1	141,574 kg	720 hrs (1 mes)

Con el oxígeno el problema deja de existir para tener lo siguiente:

Tabla 5.9
Producción mensual de un reactor con oxígeno, considerando la eficiencia real 87.5%

Cantidad de reactores	Producción CuSO ₄	tiempo
1	3736 kg	10.5 hrs
1	256,182kg	720 hrs (1 mes)

De acuerdo a la tabla 5.9, los seis reactores producirán 1,537,092 kg por mes. Con esto se puede dejar un reactor parado y otro empleado a tres cuartos de carga. Para de forma inmediata tener beneficios productivos.

Haciendo referencia a los gastos fijos en el proceso tradicional podemos decir que el mantenimiento se redujo, ya que la demanda de producción mensual se cubre con 4.7 reactores, dejando 1.3 sin uso. Con esto reducimos 936 horas hombre en el área operativa y 93.6 horas hombre en mantenimiento (los reactores se limpian por tres personas, 1 vez por mes y la operación dura tres días).

También se reduce el consumo de energía eléctrica, ya que los sopladores bajan su carga un 21.6%.

Dentro de los gastos variables, las horas extras desaparecen, ya que en los picos de producción se puede cubrir llevando a carga completa el quinto reactor en los mismos horarios de trabajo.

De los nuevos gastos generados en la parte de los fijos está el consumo de oxígeno. Del cual se utilizarán en forma mensual 49,896 m³ con los 4.7 reactores funcionando. Lo anterior sale de la explicación que se da al final del capítulo tres en la sección “condiciones de operación del oxígeno”, donde el consumo de oxígeno por hora por reactor es de 15.4m³. El precio en el mercado es de \$2.10 pesos /m³ O₂ (ver apéndice 4), lo cual genera un facturación de \$104,781.6 pesos/mes.

Lo anterior nos da una relación de:

\$0.299 pesos/kg CuSO₄ adicional*

*Al decir adicional se hace referencia a la diferencia entre la producción sin oxígeno y la producción con oxígeno.

Si tomamos en cuenta que el precio de equilibrio del CuSO₄ .5H₂O es de \$55pesos/kg. Se tiene un excelente margen de ganancia, ya que al ser llevado al mercado de exportación se puede comercializar a un precio de \$100 pesos/kg.

CONCLUSIONES

Como se pudo ver a lo largo de este proyecto, el beneficio por enriquecimiento de oxígeno en la reacción de sulfato de cobre fue importante. No sólo se logró eliminar el cuello de botella para cubrir la demanda del mercado. Sino que también se pudieron reducir gastos fijos y variables de la operación tradicional. Y digo de la operación tradicional, ya que por otra parte se tuvo un incremento de los gastos fijos por el consumo de oxígeno. Los cuales como ya se analizó en el capítulo 5, no representan una afectación en la ganancia final.

Durante el análisis del proyecto, surgieron varios puntos que le dieron fortaleza al mismo y que aunque no eran objetivos de éste proyecto, no podían ser deslindados del mismo y me dieron herramientas para futuros proyectos. Uno de ellos fue en el aspecto económico, específicamente en el punto de justificación de un proyecto, ya que en ocasiones un proyecto de esta magnitud no es viable si es medido en forma directa o unitaria, ¿Qué quiero decir con esto?, bueno, pues que al relacionar el volumen consumido de O_2 por kg de $CuSO_4$ producido puede resultar un costo más alto que el original, pero que si lo medimos por mejora de tiempo ahorrado, disminución de energía eléctrica, reducción en el pago de tiempo extra e incremento de productividad, podemos llevarnos muy gratas sorpresas para la implementación del mismo.

Por lo anterior podemos concluir que enriquecer la reacción de sulfato de cobre con oxígeno, le trajo a este proceso beneficios inmediatos. Que de otra forma sólo hubieran podido resolverse reubicando la planta, ya que por falta de espacio era imposible instalar dos reactores más. Posiblemente los gastos no serán reducidos en un gran porcentaje, debido al costo del oxígeno, pero vuelve a hacer un proceso que da confiabilidad a sus clientes y sobre todo fortaleza en un mercado tan competitivo y globalizado como es el que se presenta en este nuevo siglo.

APÉNDICES

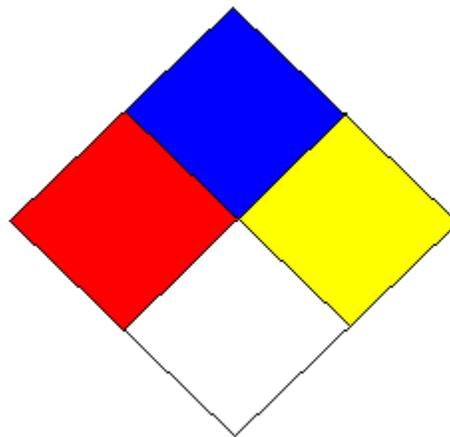
Apéndice 1

Seguridad y NFPA

Uno de los aspectos mas importantes en la industria es la seguridad, en ella se invierte millones de dólares, con el único fin de garantizar el bienestar del personal y equipo. Por esta razón la incluyo en este apéndice, con el propósito de concientizar en los aspectos que se deben tomar en cuenta.

Para resumir la información de seguridad del producto, emplearé a la NFPA (The National Fire protection Association), la cual tiene desarrollado un sistema para indicar los riesgos para la salud, inflamabilidad y reactividad. Adicionalmente, contiene precauciones especiales las cuales pueden ser usadas cuando sea necesario. Este sistema es empleado en todo equipo que esté en estado estacionario (fijos dentro de la instalación), ya que para equipos en movimiento es empleada la nomenclatura de la ONU.

El sistema NFPA consiste en un rombo dividido en cuatro y en donde cada sección contiene un color y un número que va del 0 al 4, estos últimos para indicar el grado de riesgo.



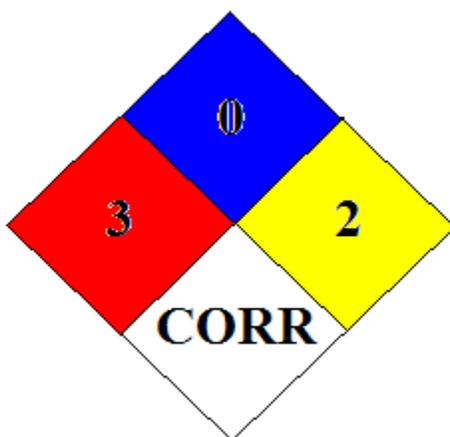
La clasificación de cada color y número es la siguiente:

Riesgos para la salud (azul)	
4	Severo Exposiciones muy cortas pueden ser fatales o causar daños serios. Se requiere el uso de equipo de protección personal.
3	Alto Exposiciones cortas pueden ser fatales o causar daños serios. Se requiere el uso de equipo de protección personal.
2	Moderado Exposición continua o intensa puede causar incapacidad temporal o posibles daños.
1	Ligero La exposición puede causar irritación
0	Mínimo Sin riesgos especiales
Inflamabilidad (rojo)	
4	Severo Gas o líquido extremadamente inflamable. Arde por debajo de los 23 °C
3	Alto Líquidos o sólidos inflamable. Arden por debajo de los 38 °C.
2	Moderado Deben ser ligeramente calentados o ligeramente expuestos a altas temperaturas, antes de que la ignición ocurra. Arden por arriba de los 37.8 °C.
1	Ligero Combustibles. Arden por arriba de los 93.3 °C
0	Mínimo No combustibles
Reactividad (amarillo)	
4	Severo Explosivos a temperatura ambiente y presión normal
3	Alto Explotan con grandes fuentes de ignición o reaccionan violentamente en confinamiento bajo calor.
2	Moderado Presenta cambios químicos violentos sin estallar
1	Ligero Puede reaccionar si es calentado.
0	Mínimo Estable.
Riesgos adicionales (blanco)	
OX	Denota materiales que son agentes oxidantes
W	Denota materiales que son reactivos al agua. Estos compuestos liberan rápidamente energía al contacto con el agua.
AC	Indica que el material es un ácido
ALC	Indica que el material es un álcali o base.
	La clavera denota un material venenoso o altamente tóxico.
	Denota riesgos de radioactividad.

Apéndice 2

Características del ácido sulfúrico

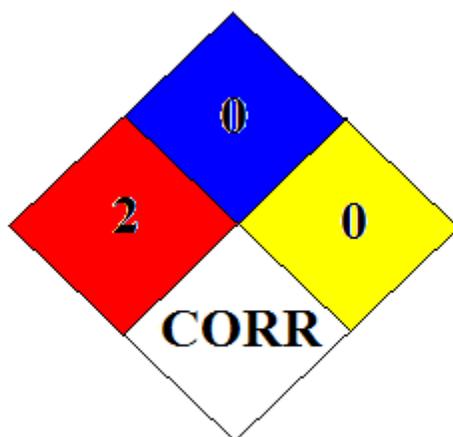
Formula química	H ₂ SO ₄
Color	Incoloro
Olor	Irritante muy característico
Inflamabilidad	Ninguna
Riesgos para la salud	Es corrosivo y provoca quemaduras al ingerir, inhalar o al contacto con la piel. La exposición severa puede ser letal.
Compatibilidad	Reacciona violentamente con materiales orgánicos generando riesgo de fuego o explosión por lo tanto evite que el líquido alcance drenajes, trincheras, sótanos, etc. formando diques de arena o tierra. Evite fuentes de ignición cercanas ya que genera H ₂ el cual es altamente explosivo.
Número de la ONU	1830



Apéndice 3

Características del Sulfato de Cobre

Formula química	CuSO ₄
Color	Cristales azules
Olor	Inodoro
Inflamabilidad	No inflamable.
Riesgos para la salud	Puede provocar irritación y al contacto continuo quemaduras serias.
Reactividad	Estable
Compatibilidad	Es incompatible con hidroxilamina, magnesio, acetileno. Es altamente corrosivo cuando está húmedo.
Número de a ONU	3077



Apéndice 4

Para la determinación de precios se debe de considerar lo siguiente:

- Costo de distribución
- Costo de producción
- Inversión de equipo
- Volúmenes a consumir del producto a vender

Con estos datos se determinan:

- Utilidad bruta: capital después de gastos fijos (costo de producción, distribución y varios)
- Gross margin: es un índice expresado en porcentaje de la relación entre la utilidad bruta y las ventas totales del producto
- Utilidades antes de impuestos: es el resultado de la resta de la utilidad bruta menos gastos de ventas y depreciación
- Ganancias (operating profit): es el índice de la relación entre las utilidades antes de impuestos y las ventas totales
- Flujo de efectivo: Es la suma de la utilidad después de impuestos más la depreciación que tuvimos para recuperar el valor de los activos.
- Tasa interna de retorno: es aquella tasa de interés (tasa de descuento) que hace igual a cero el valor actual de un flujo de beneficios netos. En otras palabras es la recuperación a través del flujo de efectivo de la inversión efectuada.

Apéndice 5

Conversiones

1 kg oxígeno equivale a 0.7545 m³ oxígeno a 21.1°C y 1atmósfera de presión

Apéndice 6

LIXIVIACIÓN: La extracción sólido líquido o lixiviación es una operación para separar los constituyentes solubles de un sólido inerte con un solvente.

El proceso completo de extracción suele comprender la recuperación por separado del solvente y del soluto.

La extracción sólido-líquido tiene gran importancia en un gran número de procesos industriales. En metalurgia en la extracción de: cobre con ácido sulfúrico, oro con cianuro, etc.

Muchos productos orgánicos naturales se separan de sus estructuras originales mediante lixiviación. Por ejemplo el azúcar se separa por lixiviación de la remolacha con agua caliente; los aceites vegetales se recuperan a partir de semillas, como las de soya y algodón mediante lixiviación con disolventes orgánicos; el tanino se disuelve a partir de raíces y hojas de plantas. El té y el café se preparan mediante técnicas y equipo muy similares a los utilizados en las verdaderas operaciones de lixiviación. Además, los precipitados químicos con frecuencia se lavan de sus aguas madres adheridas mediante técnicas y equipo muy similares a los utilizados en las verdaderas operaciones de lixiviación, como en el lavado de licor de sosa cáustica del carbonato de calcio precipitado después de la reacción entre óxido de calcio y carbonato de sodio.

ATRACCIÓN IÓN-DIPOLO: Es la fuerza que existe entre un ión y una molécula polar neutra que posee un momento dipolar permanente, las moléculas polares con dipolos tienen un extremo positivo y un extremo negativo. Los iones positivos son atraídos al extremo negativo de un dipolo, en tanto que los iones negativos son atraídos al extremo positivo.

MONEL: es el nombre que se asigna a las aleaciones comerciales con razones níquel-cobre de aproximadamente 2:1 de peso. El monel es más duro que el cobre y extremadamente resistente a la corrosión.

PVDF (Polifluoruro de vinilideno): presenta una excelente resistencia química a una gran variedad de fluidos y solventes. En particular una buena resistencia a los ácidos orgánicos e inorgánicos, hidrocarburos y solventes halogenados.

BIBLIOGRAFÍA

1. Brown-LeMay-Bursten. Química la ciencia central. 3ª edición. Editorial Prentice Hall Hispanoamérica. México. 1987.
2. Orozco Fernando. Análisis químico cuantitativo. 10ª Edición. Editorial Porrúa, S.A. México. 1978.
3. Stephen, H. Solubilities of inorganic and organic compounds. Vol I. binary systems. 1st edition Oxford Pergamon Press. New York. 1963.
4. Linke W. Solubilities of inorganic and metal organic compounds. 4th edition. American Chemical Society. Washington, D.C. 1958.
5. Ayres, Gilbert H. Análisis químico cuantitativo. 1ª edición. Editorial Harla. México. 1970.
6. Costa López José. Curso de Ingeniería química. Universidad de Guadalajara. 1990.
7. Perry John H. Manual del Ingeniero Químico. 2ª edición / 5ª edición en español. Editorial McGraw-Hill.. 1982.
8. Babor, Joseph A. Química general moderna. 2ª edición. Editorial Pueblo. 1976 .
9. Guía de gases industriales y líquidos criogénicos. 5ª edición. Praxair. 2000.
10. Bravo Luna A. UNAM. Escuela Nacional de Ciencias Químicas. Estudio de los procesos de cristalización en la obtención de sulfato de cobre pentahidratado. Tesis. 1949.
11. Maass E. UNAM. Escuela Nacional de Ciencias Químicas. La industria del sulfato de cobre en México. Tesis. 1949.
12. Del Campo Ruiz S. UNAM. Facultad de Química. Producción de sulfato de cobre pentahidratado. Tesis. 1996.

13. Seidell, Atherton. Solubilities of organic and inorganics substances. 1st edition. Van Nostrand Company. New York. 1907.
14. Manual de Finanzas para no financieros. ITESM. 2002.
15. Gerhartz Wolfgang. Yamamoto Y. Stephan. Ullmann's Enciclopedy of Industrial Chemistry. 1986.
16. Austin, George T.. Shreve's Chemical Process Industries 5th edition. I Mc Graw Hill Book Company. Singapore. 1984.
17. National Fire Protection Association (NFPA). Codes and Standards. www.nfpa.org. USA. 2005.
18. C.A. VOL 105: 155563W. Sarkisyan, R.S., Aivazyan, V.T., Airapetyan, S.G., Sukiasyan R.M. Producción de sulfato de cobre. U.R.S.S.. 1986.
19. NFPA ácido sulfúrico. Departamento de Seguridad e Higiene. Met-Mex Peñoles. 1997.