

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



PROYECTO PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO
CIVIL QUÍMICO

**DIMENSIONAMIENTO DE UNA PLANTA PARA
LA RECUPERACIÓN DE ZINC COMO $ZnSO_4$
 $7H_2O$, A PARTIR DE POLVOS DE HORNO
ELÉCTRICO DE FUNDICIONES DE COBRE,
CON ÁCIDO SULFÚRICO.**

Juan Francisco J. Hiche Larraín

Profesor Guía:

Marco Aurelio Solar B.

2012

Agradezco a mis Padres Juan Francisco e Inés, por darme la posibilidad de estudiar y apoyarme durante el proceso para convertirme en un profesional. Un saludo cariñoso y especial a Don Marco, por guiarme en esta última etapa.

Resumen

El presente proyecto tiene por finalidad dimensionar una planta para tratar polvos de horno eléctrico de Tratamiento de Escorias de Fundiciones de Cobre (que son considerados como desechos tóxicos por su contenido de Arsénico) con alto contenido de Zinc, para su recuperación como Sulfato de Zinc Heptahidratado, de una manera eficiente.

Las pruebas exploratorias fueron realizadas a escala de laboratorio, tomando en cuenta variables como la variación de pH, la concentración de ácido y la relación polvos/solución lixivante.

Los mejores resultados dan una recuperación de Zinc de un 97%; con una relación de 1:1,84 moles de Oxido de Zinc a moles de Ácido Sulfúrico. Estos resultados fueron utilizados para el dimensionamiento de una planta industrial de capacidad de 100 ton de polvo al mes.

Para optimizar la formación de cristales de sulfato heptahidratado, que es el producto, se recomienda agregar el ácido sulfúrico requerido para la lixiviación en la etapa de cristalización, debido al efecto de ión común.

Esta etapa, se realiza por una disminución de temperatura, por lo que se asume que: el reactor, las bombas de distribución, las cañerías y el filtro, tienen sistema de aislación para evitar cristalizaciones en el sistema.

INDICE CONTENIDOS

Resumen.....	IV
INDICE CONTENIDOS.....	V
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Antecedentes Históricos de Zinc.....	2
1.2 Propiedades del Zinc	5
1.2.1 Propiedades Químicas	6
1.2.2 Propiedades Físicas.....	7
1.3 El Zinc en el Organismo.	8
1.4 Usos del zinc.....	11
1.5 Producción y Consumo de Zinc	13
1.5.1 Zinc en Latinoamérica	14
1.5.2 Zinc en Chile	15
1.6 Sulfato de Zinc.....	20
1.6.1 Curva de solubilidad Sulfato de Zinc.....	22
1.7 Objetivo General	23
1.8 Objetivos Específicos	23
2. MARCO TEÓRICO.....	24
2.1 Lixiviación de Zinc	24
2.1.1 Lixiviación por agitación	25
2.2 Reactor	29
2.2.1 Reactores Continuos.....	32
2.2.2 Reactores Discontinuos	32
2.3 Balance de Energía.....	37
2.3.1 Calor Generado por la Reacción.....	37
2.4.2 Perdida de Calor por Convección Natural.....	38
2.4.3 Calor necesario para elevar la temperatura de 25 a 100°C	39
3. PROCESO DE OBTENCIÓN DE SULFATO DE ZINC.....	41
3.1 Introducción	41

3.2 Descripción general de proceso	43
3.3 Disposición de Residuos Finales.....	45
4. DIMENSIONAMIENTO DE LOS EQUIPOS PRINCIPALES	46
4.1 Reactor	46
4.2 Filtro	48
4.3 Batea o Cristalizador	49
4.4 Centrifuga	50
5. BALANCE DE MASA.....	51
5.1 Reactor	51
5.1.1 Condiciones Operación	51
5.1.2 Balance para el Zinc y el Cobre.....	53
5.2 Batea o Cristalizador	55
5.2.1 Balance Cristalizador en Régimen.....	55
5.3 Diagrama de Flujo y Balance de masa general en régimen.....	58
6. BALANCE DE ENERGIA	59
6.1 Reactor	59
6.1.1 Calor Generado por la Reacción.....	60
6.1.2 Calor perdido por el reactor a través de Convección Natural.....	63
6.1.3 Calor necesario para elevar la temperatura de 25 a 100°C	67
7. ESTIMACIÓN DE COSTOS	71
7.1 Costos de inversión	71
7.1.1 Capital Fijo.....	71
7.1.2 Capital de Trabajo.....	75
7.1.3 Gastos de Puesta en Marcha.....	75
7.2 Costo Total del producto	76
7.2.1 Costos de Producción o de Operación.....	76
7.3 Gastos Generales de la Empresa.....	81
7.3.1 Gastos de Distribución y Venta	81
7.3.2 Gastos generales Administración	81
8. FLUJO DE CAJA	83
8.1 Calculo Flujo de Caja	83
8.2 Cálculo del Valor Actual Neto (VAN)	85

8.3	Calculo del Tasa Interna de Retorno (TIR)	88
9.	ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD	89
10.	CONCLUSIONES	93
11.	BIBLIOGRAFIA.....	94
12.	ANEXO A	96
13.	ANEXO B.....	103
14.	ANEXO C.....	120

INDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 - Propiedades químicas del zinc.	6
Tabla 1.2 - Propiedades Físicas del Zinc.....	7
Tabla 1.3 - Ingesta diaria recomendada de zinc según el Departamento de Nutrición del IOM y USDA	9
Tabla 1.4 – Zinc en Alimentos	9
Tabla 1.5 - Valores de ingesta máxima tolerable de zinc.	10
Tabla 1.6- Producción Minera.....	14
Tabla 1.7 – Importaciones Zinc años 2008-2009	19
Tabla 1.8 – Propiedades Físicas y Químicas Sulfato de Zinc.....	21
Tabla 1.9.....	22
Tabla 2.1 – Reactor característica	31
Tabla 2.2 – Ventajas Desventajas	34
Tabla 2.3 – Tiempos de reacción	36
Tabla 3.1.....	41
Tabla 3.2 – Datos obtenidos.....	42
Tabla 4.1 – Superficie de Filtro.....	48
Tabla 5.1 – Condiciones Operacion.....	51
Tabla 5.2 - Datos	52
Tabla 5.3 – Masa inicial y Final	¡Error! Marcador no definido.
Tabla 6.1 – Calores de Formación.....	61
Tabla 6.2 – Propiedades aire	64
Tabla 6.3 – Tabla de valores, Convección natural - Transferencia de Calor, J.P. Holman	65
Tabla 6.4 – Dimensiones Reactor.....	65

Tabla 6.5 – Convección Natural	66
Tabla 7.1 – Capital Fijo	76
Tabla 7.2 – Materias Primas.....	77
Tabla 7.3 – Mano de Obra.....	77
Tabla 7.4 - Costo Total del Producto	82
Tabla 8.1 – Flujo de Caja	84
Tabla 8.2 – Flujo de caja 10 años.....	86
Tabla 8.3 – Flujo de caja 5 años.....	87
Tabla 8.4 – Resumen VAN y TIR	88
Tabla 9.1 – Análisis sensibilidad 5 años	89
Tabla 9.2 – Análisis sensibilidad 10 años	91
Tabla 13.1.....	107
Tabla 13.2.....	109
Tabla 13.3.....	116
Tabla 13.4.....	116

INDICE ILUSTRACIONES

Ilustración 1.1- SNMPE Marzo 2010.....	12
Ilustración 1.2 - LATIZA, 2010.....	13
Ilustración 1.3 - Participación por País, LATIZA.....	15
Ilustración 1.4 - Anuario de Estadísticas del Cobre y otros Minerales, COCHILCO	16
Ilustración 1.5 – Producción Zinc en Chile, Anuario de Estadísticas del Cobre y otros Minerales ..	17
Ilustración 1.6 – Exportación Zinc Chile, Anuario de Estadísticas del Cobre y otros Minerales	17
Ilustración 1.7 – Consumo América, LATIZA	18
Ilustración 1.8 – Curva de solubilidad	22
Ilustración 2.1 – Agitación mecánica	28
Ilustración 2.2 – Tipos Rotores.....	28
Ilustración 2.3 – Tipo de movimiento	29
Ilustración 2.4 – Reactor por Lotes	35
Ilustración 4.1 - Reactor	47
Ilustración 4.2 - Modelos centrifugas	50
Ilustración 5.1	56
Ilustración 5.2	56
Ilustración 6.1	59
Ilustración 9.1 – Sensibilidad VAN.....	90
Ilustración 9.2 – Sensibilidad TIR	90
Ilustración 9.3 – sensibilidad VAN	91
Ilustración 9.4 – Sensibilidad TIR	92
Ilustración 13.1	106
Ilustración 13.2	116
Ilustración 14.1	125
Ilustración 14.2	126

Ilustración 14.3	127
Ilustración 14.4	128
Ilustración 14.5	129
Ilustración 14.6	130
Ilustración 14.7	131

1. INTRODUCCIÓN

El zinc es uno de los elementos menos comunes; se estima que forma parte de la corteza terrestre en un 0.0005% a 0.02%. Ocupa el lugar 25 en orden de abundancia entre los elementos siendo su símbolo “Zn”, cuyo número atómico y peso atómico son 30 y 65.37 respectivamente. Es un metal químicamente activo, el cual puro y recientemente pulido es de color blanco azulado, lustroso y moderadamente duro (2.5 en la escala de Mohs), el cual toma un color gris al contacto con el aire húmedo.

Se encuentra principalmente en minerales como la blenda o esfalerita, compuesto principalmente por Sulfuro de Zinc (ZnS). La blenda contiene Sulfuro de Hierro II (FeS) y cuando el porcentaje de hierro es bajo, recibe el nombre de blenda acaramelada, mientras que si su contenido de hierro es alto, recibe el nombre de marmatita. También se encuentra como Oxido de Zinc (ZnO) en la cincita; como silicato de zinc en la hemimorfita; como carbonato de zinc en la esmitsonita, siendo las fuentes de zinc más utilizadas las menas de esmitsonita y la esfalerita.

No solo se encuentra en las rocas y suelos sino también en el aire, el agua, las plantas, animales y seres humanos.

El zinc desempeña un papel importantísimo en los procesos biológicos de todos los organismos vivos, y es por este motivo que se le denomina como elemento fundamental.

Aparte de ser esencial en nuestro organismo, también lo es en la fabricación de muchos artículos y productos que forman parte de nuestra vida cotidiana.

1.1 Antecedentes Históricos de Zinc

Es muy probable que el zinc fuese conocido por los pueblos antiguos, aunque su producción y uso fueran muy ocasionales y su naturaleza ignorada. La primera referencia que existe, la realiza Strabos en el pasaje que escribe a Andriera en Misia¹, en la cual se refiere al zinc como “plata falsa”.

La pieza de zinc más antigua que se conoce es una estatuilla de un ídolo prehistórico hallado en el yacimiento de Dordoch en Transilvania², con un 87,5% de contenido de zinc. También en las ruinas de Cameros (destruida 500 años a.C.) y de Pompeya (destruida en la erupción del Vesubio), se hallaron respectivamente, dos brazaletes rellenos de zinc y una fuente en la cual la parte superior del frontal está recubierta de zinc.

Hay referencias de que el latón era conocido por los romanos por lo menos desde el año 200 a.C. e incluso, en los tiempos del Emperador Augusto se describe un procedimiento para fabricar latón, fundiendo en un crisol óxido de zinc, minerales con carbón y cobre. Según este procedimiento, primero se reducía lentamente el óxido de zinc, los vapores de éste se difundían en el cobre y finalmente se subía la temperatura para fundir la carga.

En la edad media, los alquimistas conocían procedimientos para transmutar el cobre en oro, cuya operación realmente consistía en fabricar latón.

A lo largo del siglo XVI, Paracelso³ aplicó el nombre de zinc al metal que hoy se conoce como tal.

¹ Antigua región situada en la parte noroccidental de la península de Anatolia. Tenía salida a la costa del Mar de Mármara y a la del Mar Egeo. Antiguamente pertenecía a los territorios de Grecia.

² Región histórica localizada en el centro de Rumania

³ Teofrasto Paracelso, alquimista, médico y astrólogo suizo, fue conocido porque se creía que había logrado la transmutación del plomo en oro.

En Asia, Kazwui, llamado el Plinio de Oriente, que murió hacia el año 630 d.C. indica que el zinc era conocido en China y se aplicaba para fabricar monedas y espejos.

Puede ser que el primer minero-metalúrgico de la industria del zinc fuera el Maharaja⁴ de Mewar, quien explotó minas en el área de Zawar, y desarrollo en los años 1380 d.C. una importante industria minera, cuyo testimonio existente son los grandes escoriales de residuos con contenidos de zinc y plomo.

En el siglo XVII, 1620, un barco portugués que transportaba zinc desde las Indias Orientales, fue apresado por holandeses, y su carga fue vendida en Paris y otras ciudades bajo el nombre de "Speuter", lo que con el tiempo derivó a "Spelter", nombre con el que comercialmente aun se conocen los lingotes de zinc.

A mediados del siglo XVIII los ingleses importaron de China la tecnología de fabricación de zinc por destilación y se levantó una fundición en Bristol (Inglaterra), en donde se montó un horno similar a los utilizados para la obtención del vidrio que podía alcanzar 1.000°C. También comienza en Silesia la obtención de zinc a finales del mencionado siglo en dichos hornos para vidrio en los que se introducían las retortas, saliendo gases y vapores por la parte alta de la carga a un condensador del que drenaba el metal a un plato. Los belgas desarrollaron un horno de reverbero con la posibilidad de cargar varias filas de retortas horizontales con sus correspondientes condensadores acoplados en la parte externa del horno.

En el año 1812 en la ciudad de Lieja (Bélgica), se realizó por primera vez la laminación de chapas de zinc.

Durante el año 1880 se dieron los primeros pasos en la hidrometalurgia del zinc, tostando una mena compleja sulfurada, sulfatizándola y disolviendo el sulfato de zinc formado. El sulfato de zinc se cristalizó y se utilizó para la preparación del Spelter.

⁴ Término en varios idiomas de la India, que significa 'gran rey'

El primer trabajo experimental para la obtención de zinc electrolítico se realizó en 1881, electrolizando una solución de sulfato de zinc, obtenida del lixiviado de un mineral tostado, usando ánodos de plomo y cátodos de cobre o zinc. A fines de 1890 se construyó una planta para este fin, pero fracasó, lo que derivó a que la idea de obtención de zinc electrolítico descansara por un tiempo.

El descubrimiento de la flotación con espumas a principios del siglo XX revolucionó la industria del zinc, en particular cuando se puso en marcha la flotación diferencial, lo que junto con la gran demanda de zinc durante la Primera Guerra Mundial, revolucionó su metalurgia tanto de manera cuantitativa como cualitativa. Por una parte, permitió utilizar concentrados de zinc con menos impurezas y propició la construcción de nuevas fábricas de zinc. Además se solucionaron los problemas que impedían el desarrollo electrolítico, lo que permitió establecerlo de manera comercial.

La reducción vertical en continuo se desarrolló con los procesos New Jersey⁵ y St. Joseph⁶; sin embargo, la reducción en horno eléctrico comenzó a principios de siglo en Suecia; no obstante, no fue hasta que el horno St. Joseph, para la producción de óxido de zinc, se puso en marcha en 1930 que se dispuso de una tecnología bien desarrollada. Todo el zinc obtenido por destilación continua procede del método New Jersey o del St. Joseph.

Hoy día, a comienzos del siglo XXI, hay que decir que la tecnología electrolítica es el desarrollo que más tonelaje de metal produce, por su economía y por la calidad del metal obtenido. Un hito importante, que hizo muy rentable la recuperación electrolítica del zinc, fue la precipitación jarosítica⁷ del hierro desarrollada en España, en los años sesenta.

⁵ Horno de retorta vertical para la destilación del zinc, desarrollado por la Compañía New Jersey Zinc, de Pennsylvania, en EEUU, a finales de los años 20.

⁶ Horno para la producción de óxido de zinc, desarrollado por la compañía Saint Joseph. Fue la primera vez que se intentó enfriar vapores metálicos con metal líquido.

⁷ El hierro puede ser precipitado como jarosita, que es un compuesto sintético cristalino cuya fórmula es $M_2Fe_6(SO_4)_4(OH)_{12}$. Añadiendo NH_4^+ o Na^+ a la disolución, ajustando el pH a 1.5 y fijando una temperatura de unos 90°C se consigue la precipitación. Esto ayuda a controlar el nivel de hierro en disolución.

1.2 Propiedades del Zinc

Sin alear, su resistencia y dureza son mayores que las del estaño y el plomo, pero apreciablemente inferiores a las del aluminio y el cobre, con pocas aplicaciones estructurales. A temperatura ambiente es frágil pero se torna maleable por encima de 100°C con lo que ya se puede laminar y utilizar para el conformado.

Cuando se alea entre un 20 a 22% con aluminio, se obtienen unas aleaciones que desarrollan la propiedad de la súper plasticidad con lo que se pueden conformar a bajas temperaturas y a vacío. Utilizadas en moldeo, estas aleaciones vuelven a adquirir, a temperatura ambiente, dureza y resistencia.

El zinc, a pesar de su baja nobleza, tiene muy buena resistencia a la corrosión atmosférica utilizándose en la protección del acero (galvanizado). Las posiciones relativas del hierro y el zinc en la tabla electroquímica de potenciales colocan a éste como un material menos noble que el primero; esto hace que, en un medio acuoso salino, cuando se establece una pila, el zinc actúe de ánodo de sacrificio protegiendo al acero, a quien recubre en el galvanizado, en aquellos puntos en los que se produzca una fisura de la capa protectora.

1.2.1 Propiedades Químicas

El zinc, el cadmio y el mercurio constituyen el grupo II B de la tabla periódica y su estructura electrónica es la siguiente:

Elemento	N° Atómico	Orbital					
		k	l	m	n	o	p
Zn	30	2	8	18	2		
Cd	48	2	8	18	18	2	
Hg	80	2	8	18	32	18	2

Tabla 1.1 - Propiedades químicas del zinc.

El zinc puede perder fácilmente sus dos electrones de valencia para dar lugar a compuestos del tipo del ZnCO_3 . También forma compuestos iónico-covalentes como el ZnCl_3 . Finalmente, da lugar a zincatos, como es el caso del Na_2ZnO_2 , demostrando entonces un carácter anfótero.

En presencia de aire húmedo y CO_2 , produce un carbonato básico hidratado que se adhiere fuertemente al metal base produciendo su pasivación⁸. El zinc se disuelve fácilmente en la mayoría de los ácidos. También se disuelve este metal en disoluciones acuosas de bases fuertes o en sus sales fundidas, formando zincatos⁹. El zinc se usa en forma de polvo o gránulos como precipitante (cementante) al ser un metal reductor de otros más nobles (Cu, Cd). También es un buen agente reductor de iones tales como el férrico, manganato y cromato.

⁸ Formación de una película relativamente inerte, sobre la superficie de un material. Que lo cubre contra la acción de agentes externos. Esto provoca que la reacción química o electroquímica se va reducida o impedida.

⁹ Término relacionado a los óxidos.

1.2.2 Propiedades Físicas

En la Tabla 1.2 se muestran algunas propiedades del elemento zinc

Propiedad	Unidad	Valor
Numero atómico		30
Peso atómico		65,37
Valencia		2
Isótopos 64, 66, 67, 68, 70	%	50,9; 27,3; 3,9; 17,4; 0,5
Estructura cristalina		Hexagonal compacta
Radio atómico	nm	13,32
Radio iónico (Zn ²⁺)	nm	7,5
Punto de fusión	°C	419,5
Punto de ebullición (1 atm)	°C	907
Densidad (25°C)	g·cm ⁻³	7,14
Densidad (419,5°C; sólido)	g·cm ⁻³	6,83
Densidad (419,5°C; líquido)	g·cm ⁻³	6,62
Densidad (800°C; líquido)	g·cm ⁻³	6,25
Calor de fusión (419,5°C)	J·mol ⁻¹	7384,76
Calor de vaporización (907°C)	J·mol ⁻¹	114767,12
Capacidad calorífica (sólido)	J·mol ⁻¹	C _p = 22,4 + 10,05 × 10 ⁻³ T
Capacidad calorífica (líquido)	J·mol ⁻¹	C _p = 31,40
Capacidad calorífica (gas)	J·mol ⁻¹	C _p = 20,80
Conductividad térmica (18°C; sólido)	W·m ⁻¹ ·K ⁻¹	113
Conductividad térmica (419,5°C; sólido)	W·m ⁻¹ ·K ⁻¹	96
Conductividad térmica (419,5°C; líquido)	W·m ⁻¹ ·K ⁻¹	61
Conductividad térmica (750°C; líquido)	W·m ⁻¹ ·K ⁻¹	57
Resistividad eléctrica (0 - 100°C)	μΩ·cm	ρ = 5,46(1 + 0,0042T)

Tabla 1.2 - Propiedades Físicas del Zinc

1.3 El Zinc en el Organismo.

El Zinc es un elemento traza que es esencial para la salud humana. Forma parte del crecimiento celular, en decenas de reacciones enzimáticas y en la expulsión del dióxido de carbono, subproducto de nuestro metabolismo.

Más del 85% del total de zinc presente en nuestro organismo se deposita en los músculos, huesos, cabellos, uñas y tejidos pigmentados del ojo, concentrándose principalmente en los órganos genitales y sobre todo en la hipófisis.

Se elimina principalmente en las heces a través de secreciones biliares, pancreáticas e intestinales.

Es partícipe en el funcionamiento de 70 enzimas entre las cuales podemos nombrar las del metabolismo de hidratos de carbono, grasas y proteínas, en la síntesis de la insulina (hormona que regula la cantidad de azúcar en la sangre), el ARN y el ADN, además cumple funciones aliviando alergias, aumenta la inmunidad natural contra infecciones bacterianas y destruye elementos tóxicos como el Cadmio.

El requerimiento va desde los 2 a 11 mg. diarios y se encuentra mayormente en productos de mar, carnes y lácteos, aunque también en frutos secos y cereales fortificados. Su dosis diaria, como se muestra en la Tabla 1.3, es cubierta naturalmente en una alimentación normal.

Edad	Hombre (mg/día)	Mujer (mg/día)
0-6 meses	2	2
7-12 meses	3	3
1-3 años	3	3
4-8 años	5	5
9-13 años	8	8
14-18 años	11	9
19-50 años	11	8
>50 años	11	8
Embarazo		11-12
Lactancia		12-13

Tabla 1.3 - Ingesta diaria recomendada de zinc según el Departamento de Nutrición del IOM y USDA¹⁰

En la Tabla 1.4, se menciona la cantidad de Zinc en miligramos (mg) contenida en una porción de alimento.

Alimento	Porción	Zinc (mg)
Ostras	85 gr	76
Cereales fortificados con 100% zinc	30 gr (3/4 taza)	15
Carne vaca (80% magra)	100 gr	6.2
Carne cerdo, magra	100 gr	2.9
Carne pollo, pata	1	2.7
Carne pavo	100 gr	3.1
Garbanzos, cocidos	160 gr (1 taza)	2.5
Queso suizo	30 gr	1.2
Leche descremada	240 ml (1 taza)	1
Almendras y Nueces	30 gr	1

Tabla 1.4 – Zinc en Alimentos

Durante el embarazo, el consumo de Zinc es fundamental para el normal crecimiento del futuro bebé, pues las células del feto en crecimiento se dividen con rapidez y deben regenerarse. Además después del parto, las glándulas mamarias

¹⁰ IOM, Institute of Medicine: Instituto de Medicina y USDA, United States Department of Agriculture: Departamento de Agricultura de Estados Unidos.

proveen cantidades importantes de zinc al recién nacido, por lo que la lactancia es muy importante para el buen desarrollo del bebe.

Exceso de Zinc

Demasiada cantidad de Zinc puede causar serios problemas de salud¹¹, como: úlcera de estómago, irritación de la piel, vómitos, náuseas y anemia. Esto puede llevar a dañar el páncreas y perturbar el metabolismo de las proteínas, además de causar arterioesclerosis.

En el caso de las mujeres, su acumulación puede incluso producir defectos de nacimiento. Por lo que es recomendable no superar los mg/día que se muestran en la Tabla 1.5.

Edad	Hombre (mg/día)	Mujer (mg/día)
0-6 meses	4	4
7-12 meses	5	5
1-3 años	7	7
4-8 años	12	12
9-13 años	23	23
14-18 años	34	34
>19 años	40	40
Embarazo y Lactancia < 18 años		34
Embarazo y Lactancia > 18 años		40

Tabla 1.5 - Valores de ingesta máxima tolerable de zinc.

¹¹ Exposiciones al clorato de Zinc intensivas pueden causar desordenes respiratorios. IOM, Institute of Medicine

Déficit de Zinc

Cuando la gente absorbe poco Zinc estos pueden experimentar una pérdida del apetito, pérdida total o parcial del gusto y la pérdida de agudeza olfativa, pequeñas llagas y erupciones cutáneas.

Aunque su conocimiento es aún reciente, la carencia de Zinc se produce por la mala asimilación o por pérdidas excesivas de sudor u orina.

Los síntomas más comunes de la carencia de zinc suelen ser en los hombres, los problemas de próstata en mayores a 45 años y dificultades para la erección; en las mujeres las irregularidades menstruales, retraso de crecimiento uterino y anemia. Otros síntomas son la caída del cabello, la anorexia, las diarreas, náuseas, vómitos y fiebre.

Esto conlleva a que nuestras defensas se debiliten, y adquieran con mayor facilidad y rapidez diferentes infecciones.

En los niños se apreciará un retraso en el crecimiento, síntoma en general común a cualquier carencia de nutrientes.

1.4 Usos del zinc

El zinc es un mineral esencial para la sociedad moderna. En la actualidad, es empleado en los procesos industriales, formando parte de las construcciones de viviendas, y en la creación de insumos intermedios.

Como podemos apreciar en la Ilustración 1.1, la galvanización es el principal uso que se le da al zinc (52%), ya que tiene como objetivo reducir la corrosión en los metales.

El latón¹² ocupa el segundo lugar en su utilización, y su uso se da en campos del armamento, ornamentación y terminales eléctricos.

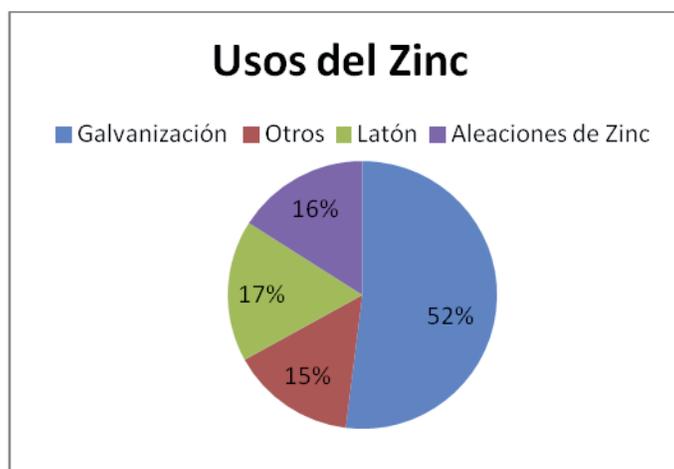


Ilustración 1.1- SNMPE¹³ Marzo 2010

El tercer lugar lo tiene al rubro de las aleaciones de Zinc, las que son usadas en el sector industrial para la fabricación de baterías, bases de pigmentos, desodorantes, caucho¹⁴ e incluso para separar metales preciosos.

En el sector de “Otros”, lo podemos encontrar en productos de uso diario como las cremas blanqueadoras y lociones, shampoo, cosméticos, fertilizantes, entre otros; y un uso también importante es el enfocado en la industria farmacéutica, desarrollando vitaminas que incluyen Zinc con el fin de complementar su consumo a través de los alimentos.

¹² Aleación Cobre Zinc, cuya relación puede variar para obtener diferentes propiedades.

¹³ Sociedad Nacional de Minería, Petróleo y Energía. Lima, Perú.

¹⁴ El Zinc se utiliza para la protección de los rayos UV.

1.5 Producción y Consumo de Zinc

Según las estadísticas, el Zinc a medida que pasa el tiempo adquiere importancia en la economía mundial, ya que cada año los productos elaborados con zinc o contenido de zinc aportan cerca de 40 mil millones de dólares a la economía mundial. Esto ha provocado un aumento en el consumo, y en la producción minera del mineral como se ve reflejado en las Ilustraciones 1.2, 1.3 y en la Tabla 1.6.

	Producción Minera	%	Producción Metálica	%	Consumo	%
Europa	673	9.2%	1,435	19.1%	1,522	20.9%
África	170	2.3%	153	2%	97	1.3%
Latinoamérica	1,598	21.8%	565	7.5%	406	5.6%
EE.UU. y Canadá	844	11.5%	533	7.1%	595	8.2%
Asia	3,226	44%	4,534	60.4%	4,534	62.3%
Oceanía	822	11.2%	291	3.9%	123	1.7%
Total Mundial	7,334	100%	7,511	100%	7,274	100%

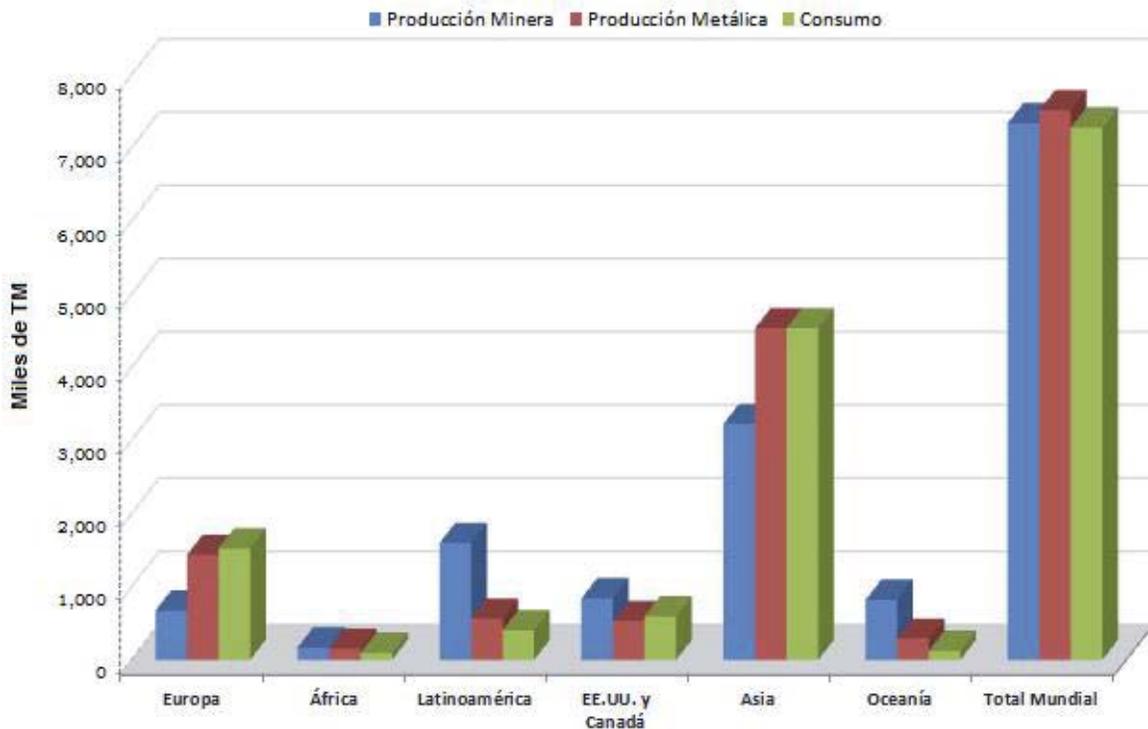


Ilustración 1.2 - LATIZA, 2010

1.5.1 Zinc en Latinoamérica

Perú, es quien aporta con la mayor producción minera del Zinc en Latinoamérica, como se aprecia en la Tabla 1.6, y el tercero en cuanto a la producción Metálica de Zinc con un 25%, por debajo de México y Brasil, quienes aportan con el 38% y 32% respectivamente.

1.5.1.1 Producción Minera

Producción Minera del Zinc (en miles de TM)					
	2007	2008	2009	2010	2011 (En-Sep)
Perú	1,444	1,603	1,509	1,469	964
Argentina	27	31	32	32	30
Bolivia	214	384	434	450	338
Brasil	194	173	173	192	154
Chile	37	41	28	31	17
Guatemala	20	14	-	-	-
Honduras	29	28	36	34	20
México	452	454	478	562	495
Latinoamérica	2,417	2,728	2,690	2,770	2,018
Estados Unidos	803	779	736	751	586
Canadá	630	716	699	649	484
América	3,850	4,223	4,125	4,170	3,088
Mundo	11,128	11,840	11,552	12,322	9,500

Tabla 1.6- Producción Minera

1.5.1.2 Participación por País

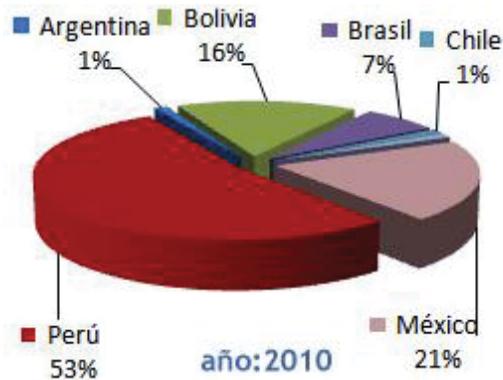


Ilustración 1.3 - Participación por País, LATIZA

1.5.2 Zinc en Chile

El principal yacimiento de extracción de Zinc es “*Minera el Toqui*”, mina subterránea localizada en la XI Región de Aysén, la cual pertenece a la corporación canadiense Breakwater Resources Limited de Toronto. Es una mina productora de Zinc, Oro, Plata y Plomo.

Las regiones que aportan a la producción de Zinc son la región de Aysén y la RM, y cuyos aportes son: 21.289 TM de fino de Zinc la Región de Aysén y 6.373 TM de fino de Zinc la RM, como se aprecia en la Ilustración 1.4, según datos hasta el año 2010.

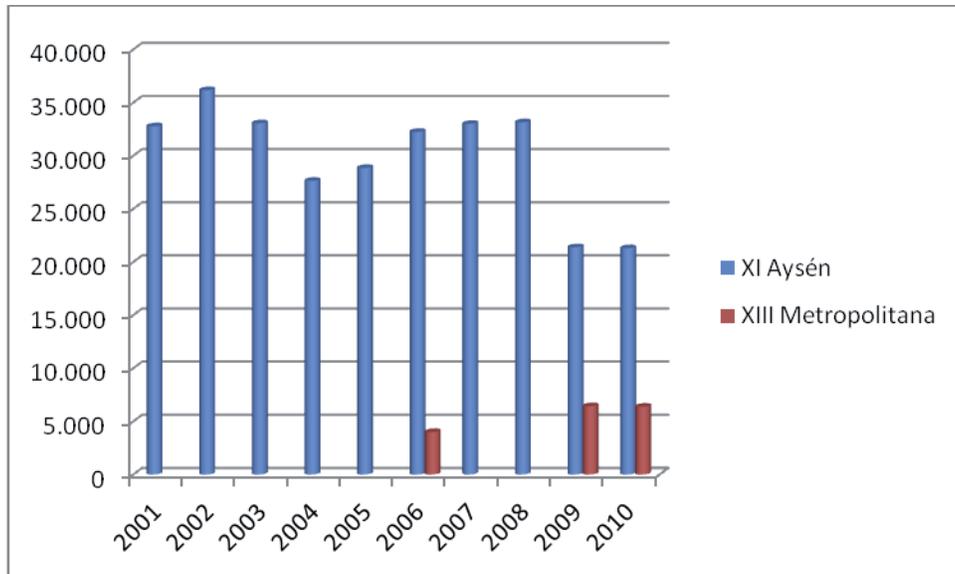


Ilustración 1.4 - Anuario de Estadísticas del Cobre y otros Minerales, **COCHILCO**

1.5.2.1 Producción de Zinc de la Minería Metálica de Chile

A continuación, en la Ilustración 1.5, se pueden observar las TM de fino producidas en Chile.

año	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
TM de fino	32.762	36.161	33.051	27.635	28.841	36.238	36.453	40.519	27.801	27.662

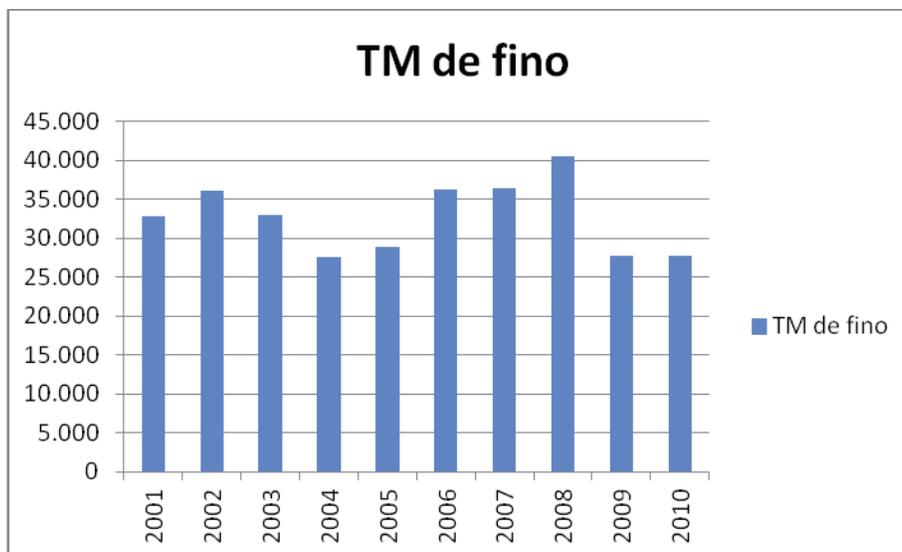


Ilustración 1.5 – Producción Zinc en Chile, Anuario de Estadísticas del Cobre y otros Minerales

1.5.2.2 Embarques de Exportación de la Minería Metálica de Chile

Año	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
Mineral de Zinc (TMN)	57.068	93.458	69.901	59.900	64.314	125.061	64.206	80.313	43.531	63.128

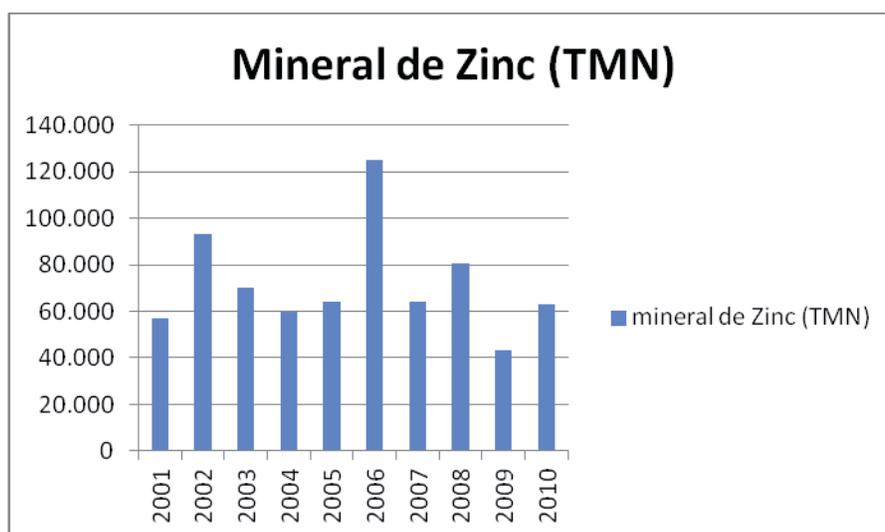


Ilustración 1.6 – Exportación Zinc Chile, Anuario de Estadísticas del Cobre y otros Minerales

1.5.2.3 Consumo

El consumo nacional metálico de Zinc, como se muestra en la Ilustración 1.7, corresponde al 1% a nivel latinoamericano, muy por debajo de Brasil y México con un consumo de 36% y 32% respectivamente.

América-Consumo Metálico del Zinc -(en miles de TM)					
	2007	2008	2009	2010	2011(En-Sep)
Perú	74	73	52	81	68
Argentina	56	62	54	59	45
Brasil	248	248	194	241	184
Chile	10	10	9	10	8
Colombia	23	21	21	25	18
México	245	247	200	218	165
Venezuela	10	19	15	17	14
Otros	26	25	21	23	18
Latinoamérica	692	705	566	674	520
Estados Unidos	1016	1003	912	890	658
Canadá	173	164	140	149	109
América	1881	1872	1618	1713	1287
Mundo	11,276	11,505	10,845	12,579	9,445

Ilustración 1.7 – Consumo América, LATIZA

1.5.2.4 Importaciones

El Zinc, ya sea como metal o bien como óxido, sulfato, cloruro, y compuestos orgánicos tales como estearato es utilizado en diversos mercados.

Chile, al no ser un productor importante de este metal, importó cerca de 7.400 y 5.000 ton anuales de zinc a la forma de zinc metálico, sulfato de zinc y óxido de zinc, durante los años 2008 y 2009 respectivamente, según datos estadísticas del Banco Central de Chile.

A continuación en la Tabla 1.7 se mencionan los mercados más importantes donde es utilizado, con sus respectivos compuestos y cantidades importadas durante el año 2008 y 2009:

Mercado	Compuesto	Cantidad importada (ton)	
		2008	2009
Galvanización y galvanoplastía	Zinc electrolítico en lingotes	5.308	3.931
Caucho, Pinturas	Óxido de Zinc en polvo	2.248 (1806 ton Zn)	1.244 (1000 ton Zn)
Productos Agrícolas	Sulfato de zinc heptahidratado	1.046 (240 ton Zn)	250 (57 ton Zn)
Perfumería y cosméticos; Laboratorios farmacéuticos; Alimentos	Óxido de zinc en polvo grado farmacopea; alimento	14 (11 ton Zn)	14 (11 ton Zn)

Tabla 1.7 – Importaciones Zinc años 2008-2009

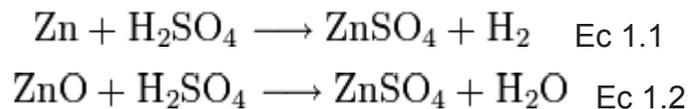
De estos datos se deduce que la industria de galvanizado es el principal consumidor de zinc, con un 60 a 70 % del total de las importaciones como compuesto “zinc electrolítico en lingotes”. Le sigue el mercado del óxido de zinc en polvo con un 23 a 26 % y por último sulfato de zinc heptahidratado utilizado en el mercado agrícola con un 5 a 12%.

1.6 Sulfato de Zinc

Es un compuesto químico cristalino, incoloro y soluble en agua. Siempre se encuentra hidratado a condiciones normales, formando principalmente Sulfato heptahidratado, $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, a condiciones ambientales.

Algunas propiedades que posee esta sal se muestran en la Tabla 1.8. Esta sal $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, pierde una molécula de agua a 30°C , transformándose en Sulfato hexahidratado, $\text{ZnSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$. Luego a 70°C , pierde otras cinco moléculas de agua transformándose en Sulfato monohidratado, $\text{ZnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$. Por último a 280°C , pierde esta última molécula de agua, transformándose en Sulfato anhidro, ZnSO_4 .

Podemos encontrarlo en la naturaleza formando parte del mineral goslarita ($\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$), o también obtenerlo a partir de la reacción de Zinc metálico, u óxido de zinc (ZnO), con ácido sulfúrico (H_2SO_4).



Usos ZnSO_4

Medicina: como cicatrizante, como control del vómito y como suplemento alimenticio.

Agronomía: suplemento alimenticio para animales, abono para plantas, como coadyuvante de pesticidas y fungicidas.

Tintorería: (mordiente) fijación de colores en productos textiles.

Preservante: en pieles, cueros y madera.

Textil: en la fabricación de “rayón”

Además de su uso en: blanqueamiento del papel, como electrolito para el electrorecubrimiento (cincado), preparación para derivados del zinc en química analítica y otros.

Algunas propiedades Físicas y Químicas.

Estado	Apariencia	Densidad (gr/ml)	Masa Molar (gr/mol)	Punto fusión	Punto ebullición
Sólido	Polvo blanco cristalino	Anhidro 3,74	Anhidro 161,454	100°C	500°C
		Hepta 1,975	Hepta 287,55		

Tabla 1.8 – Propiedades Físicas y Químicas Sulfato de Zinc

- Soluble en agua, glicerol y alcohol metílico. Insoluble en alcohol etílico.
- pH = 4,5 (solución saturada)

1.6.1 Curva de solubilidad Sulfato de Zinc

La solubilidad se define como la cantidad de soluto que se disuelve en una cantidad de solvente dado. La solubilidad de la mayoría de las sales aumenta con la temperatura.

A partir de la Tabla 1.9, se muestra la curva de solubilidad del Sulfato de Zinc Heptahidratado, Ilustración 1.8.

Datos “Perry, Manual del Ingeniero Químico, 7° Edición”.

T (°C)	0	10	20	40	50	80	90	100
gr soluto/ 100 gr agua								
ZnSO ₄ 7H ₂ O	41,9	47,0	54,4					
ZnSO ₄ 6H ₂ O				70,1	76,8			
ZnSO ₄ H ₂ O						86,6	83,7	80,8

Tabla 1.9

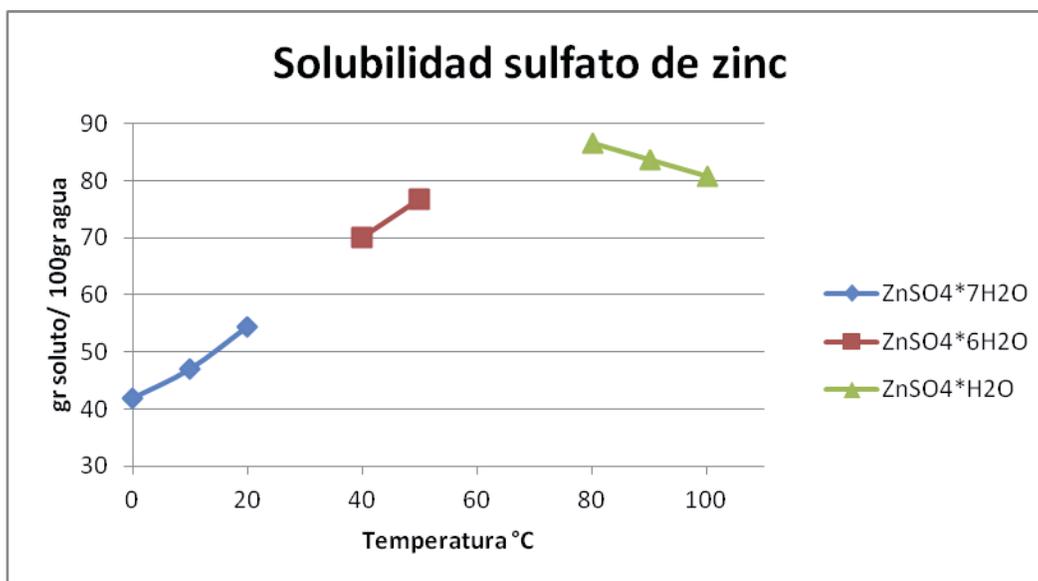


Ilustración 1.8 – Curva de solubilidad

1.7 Objetivo General

El objetivo del proyecto es aprovechar residuos de tipo industrial que posean concentraciones de Zinc, para así recuperarlo.

Esto trae consigo un beneficio económico, al recuperar el mineral y así disminuir la cantidad a eliminar de residuos, dando así, una ayuda a la eliminación ambientalmente sustentable de este tipo de residuos.

1.8 Objetivos Específicos

- Determinar la relación óptima entre la cantidad de Oxido de Zinc y Ácido Sulfúrico cargados, para obtener la mayor recuperación de Zn con la menor disolución de Cu.
- Determinar el diagrama de flujo con balance de materia y energía del proceso.
- Dimensionar y Especificar los equipos principales.
- Estimar costos de inversión.
- Estimar costos de operación.
- Disposición final de residuos.

2. MARCO TEÓRICO

La lixiviación es la disolución preferente de uno o más componentes de una mezcla sólida por contacto de un disolvente líquido.

La mayoría de los minerales y/o materiales útiles se encuentran en forma de mezclas, con grandes proporciones de componentes indeseables: por ello la lixiviación del mineral valioso es un método de separación que se aplica con frecuencia.

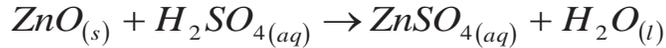
2.1 Lixiviación de Zinc

Una vez obtenida la calcina por tuesta de minerales sulfurados de Zn, compuesta principalmente de ZnO, el paso siguiente es la extracción de zinc a través de su lixiviación, mediante una solución de ácido sulfúrico (H_2SO_4). A pesar de ser un proceso aparentemente simple, se complica por la disolución simultánea de elementos y compuestos indeseables, por cuanto tienen un efecto adverso en la electrodeposición y recuperación de zinc. Es por esto que la lixiviación es tratada de tal manera que se minimice el total de impurezas presentes en la solución lixiviada.

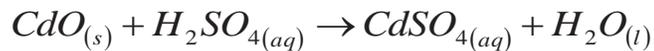
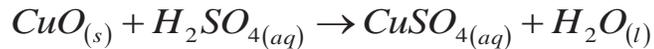
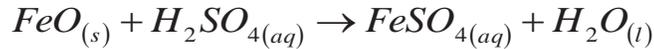
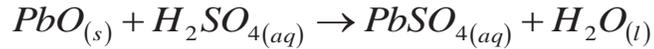
La lixiviación, de las calcinas, se lleva a cabo en dos etapas:

1. Lixiviación Neutra
2. Lixiviación Ácida

1 Lixiviación neutra: Se trata la calcina de zinc con una solución de ácido sulfúrico a $pH > 1$. Se añade el ácido al material hasta su neutralización, es decir, hasta que se ha consumido todo el ácido, produciéndose la siguiente reacción (Ec 1.2)



Al tratar el calcinado de zinc con la solución ácida, se disuelven todos los óxidos presentes y según las siguientes reacciones:



2 Lixiviación Ácida: Se añade exceso de ácido sulfúrico, para lixiviar el remanente de Zinc, que ha quedado sin lixiviar de la etapa anterior.

Al terminar, el exceso de ácido que haya quedado se neutraliza con cal o carbonato cálcico; y posteriormente se procede a la filtración.

Es importante mencionar a su vez, que la temperatura de la pulpa de lixiviación es de 50 – 60 °C debido a que la reacción es exotérmica entre el óxido de zinc (ZnO) y el ácido sulfúrico.

2.1.1 Lixiviación por agitación

La lixiviación por agitación requiere que el material haya sido sometido a molienda, aumentando el área expuesta. La agitación disminuye el espesor de la capa límite y maximiza el área de contacto. Se aplica a minerales de leyes altas, que justifican la molienda, o bien a concentrados o calcinas de tostación, que por sus menores

volúmenes permiten justificar el gasto de una agitación, a cambio de una mayor recuperación y de un menor tiempo de proceso.

Con la agitación se logran tres objetivos:

- a) Dispersar los sólidos en una emulsión, formando una suspensión homogénea.
- b) Dispersar burbujas de gas en la solución.
- c) Incrementar la transferencia de masa entre las partículas y la solución de lixiviación.

Ventajas de la lixiviación por agitación:

- a) Se obtienen mayores recuperaciones.
- b) La cinética de extracción es más rápida.
- c) Es posible una gran automatización.
- d) Se minimiza el problemas de finos.

Desventajas de la lixiviación por agitación:

- a) Altos costos de inversión y operación.
- b) Requiere molienda clasificación y separación sólido-líquido.

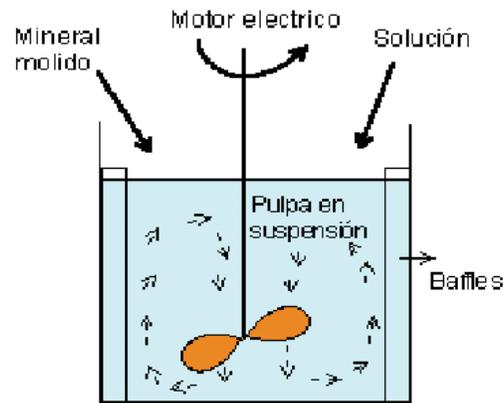
Agitación mecánica

Los agitadores mecánicos son los equipos más utilizados. Las suspensiones en la lixiviación se obtienen en estanques agitados mediante un impulsor o rotor, como se aprecia en la Ilustración 2.1. Están contruidos de concreto, acero, madera o revestidos interiormente con material anticorrosivo.

La agitación mecánica, es una transmisión de momentum, lograda por el movimiento de un rotor en el fondo de la unidad y que recibe la rotación a través de un eje vertical. Los rotores pueden dividirse en dos clases que dependen del ángulo que forme la hoja del rotor, con el eje del mezclador (Ilustración 2.2):

- Rotores de flujo axial: comprenden todos los rotores en que la hoja forme un ángulo menor que 90° con el eje del mezclador. Como ejemplos típicos se encuentran las hélices, turbinas y paletas en ángulo.
- Rotores de flujo radial: tienen hojas paralelas al eje del agitador. Los más pequeños de varias hojas se conocen como turbinas; los más grandes, de menor velocidad, se denominan paletas.

Un rotor simple rotando en un líquido de baja viscosidad en un estanque sin baffles, se forma un vórtice alrededor del cual gira el líquido. Este se mueve en círculos y hay poco movimiento vertical, pudiéndose producir estratificación en vez de mezcla, la velocidad relativa entre partículas y líquido es muy similar, a mayor velocidad el vórtice es más profundo y puede llegar a impeler, produciéndose atrapamiento de aire, como muestra la Ilustración 2.3. Este problema puede evitarse colocando baffles que impidan el flujo rotacional, sin interferir con los componentes radial y axial. Se colocan cuatro baffles opuestos de un ancho de $1/10$ del diámetro del estanque. La desventaja que introduce el colocar baffles, es que el consumo de energía puede ser hasta diez veces superior.



(a) Agitación mecánica

Ilustración 2.1 – Agitación mecánica

Algunos tipos de rotores

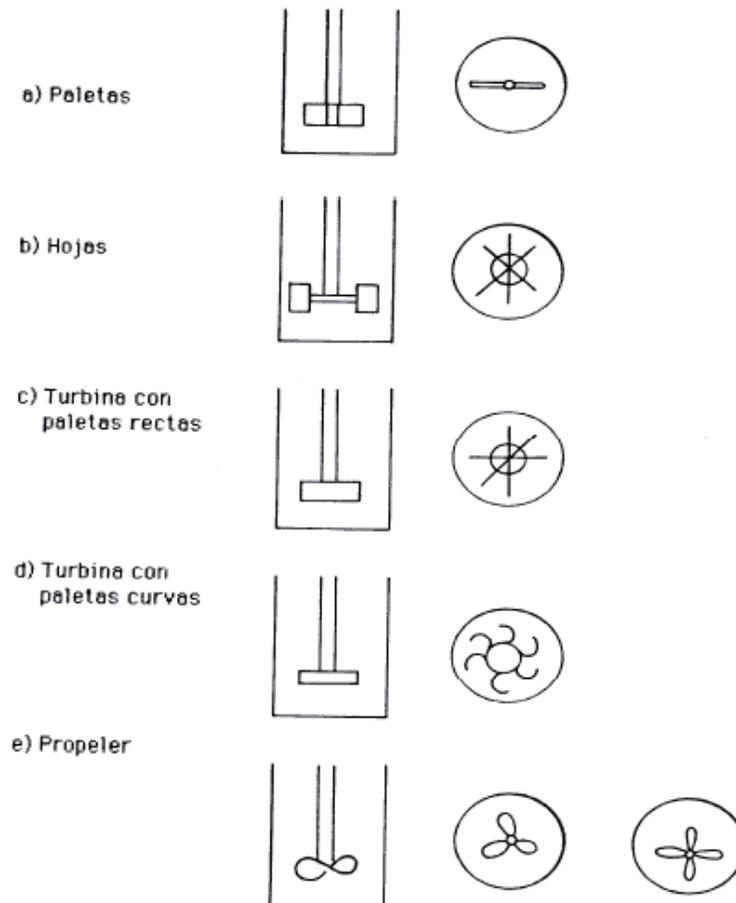


Ilustración 2.2 – Tipos Rotores

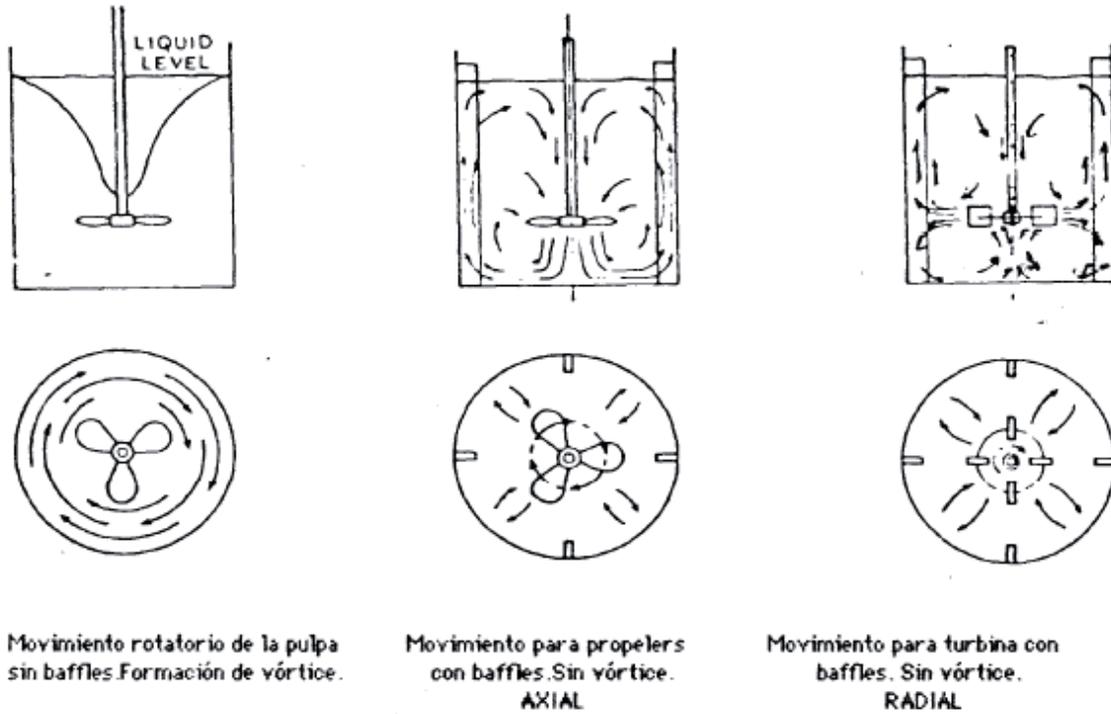


Ilustración 2.3 – Tipo de movimiento

2.2 Reactor

Un reactor químico es una unidad procesadora diseñada para que en su interior se lleven a cabo reacciones químicas. Esta unidad está constituida por un recipiente que puede ser abierto o cerrado, el cual cuenta con líneas de entrada y salida para sustancias químicas.

Los reactores químicos se clasifican típicamente según la dinámica del flujo, geometría, fases presentes y el régimen térmico. De acuerdo con lo primero, los sistemas pueden ser discontinuos, continuos o bien semicontinuos, según si el proceso se realiza por cargas o con flujo ininterrumpido de alimentación y descarga.

En general los reactores se dividen en:

Tanques agitados: recipientes en general cilíndricos, empleados para operaciones discontinuas (batch o por lotes), o continuas (CSTR) con mezcla.

Reactores tubulares: normalmente cilindros alargados de gran longitud relativa a su diámetro, empleados en operaciones continuas (TFR).

Las funciones de un reactor para se lleven a cabo las reacciones químicas de un modo apropiado pueden resumirse en tres:

- Proporcionar el tiempo de contacto necesario entre los reactivos, y catalizadores en el caso correspondiente. Este tiempo en el que permanece un elemento reaccionante en el reactor se denomina *tiempo de residencia*, parámetro que está determinado por la fluidodinámica del sistema, y por la posibilidad de mezcla o difusión; su conocimiento es determinante en el tamaño del reactor para una producción y conversión dadas, así como para prever diferencias en los productos obtenidos a causa de las distribuciones en los tiempos de residencia.
- Facilitar la mezcla de las fases presentes en la reacción. La mezcla puede producirse de modo natural, provocada por la propia fluidodinámica del reactor (como ocurre en las reacciones gaseosas), o bien se produce de forma forzada, con ayuda de agitación o mezcladores estáticos.
- Suministrar o eliminar calor al sistema y permitir las condiciones de presión y temperatura. La termodinámica nos proporciona la información necesaria respecto a la energía absorbida o desprendida durante la reacción, magnitud que debe conocerse para efectuar el diseño adecuado; en su caso, debe hacerse uso de los conocimientos sobre transmisión de calor, para el diseño de los dispositivos de calefacción o refrigeración.

La selección del tipo proceso viene dada por consideraciones como, por ejemplo, el tamaño de la planta o la complejidad del proceso. Algunas características de los reactores continuos y discontinuos se muestran en la Tabla 2.1.

Características	Discontinuo	Continuo
Operación de proceso	Ocurre una secuencia específica	Ocurre continua y simultáneamente.
Diseño de Equipo, uso	Diseñado para ser capaz de producir muchos productos.	Diseñado para producir productos específicos.
Producto	Una cantidad limitada, por lote.	Un flujo continuo.
Entorno	Variable, cambia entre operaciones	Usualmente de estado fijo, presión, flujo, etc.
Intervención del Operador	Necesario regularmente como parte de las operaciones del proceso.	Principalmente, para corregir condiciones anormales

Tabla 2.1 – Reactor característica

2.2.1 Reactores Continuos

Los típicos reactores continuos son recipientes agitados, de modo simple o en cascada, con tuberías de flujo de descarga. En estos sistemas los reactivos son alimentados continuamente al reactor, y los productos son descargados, también en forma continua.

Estos reactores se caracterizan por trabajar en condiciones estacionarias, lo que conlleva que tanto el calor generado y la composición permanecen constantes durante la operación.

Los procesos continuos tienen la ventaja que la producción en gran volumen generalmente proporciona una buena recuperación del capital invertido. Dado que los requerimientos del producto no cambian significativamente, el proceso necesitará mínimas modificaciones durante su uso, mientras se mantenga la producción.

2.2.2 Reactores Discontinuos

Es un reactor discontinuo en donde no entra ni sale material durante la reacción, sino más bien, al inicio del proceso se introducen los materiales, se lleva a las condiciones de presión y temperatura requeridas, y se deja reaccionar por un tiempo preestablecido con agitación, en donde se homogeniza la mezcla, y luego se descargan los productos de la reacción y los reactantes no convertidos.

Una ventaja clave es la flexibilidad de este tipo de proceso. Por eso se utilizan mayormente en la industria química, alimenticia y farmacéutica, donde es de vital importancia ofrecer una gran variedad de productos e introducir otros nuevos rápidamente, debido a la competitividad del mercado. Esta flexibilidad permite crear nuevos productos sin tener que construir una nueva planta, o tener que

hacer grandes cambios en los equipos. También permite producir pequeñas cantidades de un producto sin arriesgar toda la producción.

Los reactores discontinuos se caracterizan por trabajar en condiciones no estacionarias; esto es que durante la operación la generación de calor y la composición cambian.

La elección del tipo de reactor, Tabla 2.2, va de la mano con el objeto de evitar situaciones peligrosas, maximizando el rendimiento del producto deseado, y alcanzando una velocidad de producción elevada.

PFR	CSTR	Discontinuo	Semi-Discontinuo
Ventajas			
<ul style="list-style-type: none"> -Bajo inventario -Condiciones estacionarias 	<ul style="list-style-type: none"> -Condiciones estacionarias. -La agitación suministra una herramienta de seguridad. -El flujo puede ser diluido para ralentizar la reacción. 	<ul style="list-style-type: none"> -La agitación suministra una herramienta de control, seguridad. -No se limita a un solo uso, u obtención de producto. 	<ul style="list-style-type: none"> -Velocidad de adición controlable. -La agitación suministra una herramienta de seguridad. -Gran exotermia controlable.
Desventajas			
<ul style="list-style-type: none"> -Dependencia del proceso. -Posibles puntos calientes. -Agitación presente solo si son disponibles mezclas en línea. -Difícil de diseñar. 	<ul style="list-style-type: none"> -Gran inventario -Difícil de enfriar grandes masas. -Difícil empezar y detener. -Problemas de precipitación. -Bajo rendimiento global. 	<ul style="list-style-type: none"> -Grandes exotermias difíciles de controlar. -Grandes inventarios. 	<ul style="list-style-type: none"> -La temperatura de inicio es crítica (si es muy baja, se acumulan reactivos). -Problemas de precipitación.

Tabla 2.2 – Ventajas Desventajas

Por ejemplo, para producciones pequeñas lo mejor o mas adecuado será utilizar un reactor discontinuo, mientras que para grandes volúmenes de producción es mejor usar reactores continuos (PFR o CSTR).

2.2.2.1 Reactor por Lotes

También es conocido como reactor tipo Batch, mostrado en la Ilustración 2.4, y tiene la ventaja de que puede obtener conversiones elevadas, ya que mientras más tiempo permanezca el reactivo en el reactor, más de él se convertirá en producto hasta que se alcance el equilibrio o se agote el reactivo.

Este tipo de reactores se usan: en operaciones de pequeña escala, para probar procesos nuevos a los cuales les falta perfeccionamiento, procesos que son difíciles de pasar a operación continua, etc.



Ilustración 2.4 – Reactor por Lotes

En un reactor por lotes no existe flujo de entrada ni de salida de reactivos y productos, respectivamente, por ende el balance general de moles

$$\text{Entrada} + \text{generación} = \text{Salida} + \text{acumulación}$$

El tiempo del ciclo total en cualquier operación por lotes o batch, es mucho mayor al tiempo de reacción, ya que hay que tomar en cuenta en tiempo de llenado del

reactor, vaciado del reactor y el tiempo de limpieza entre lote y lote como se muestra en la Tabla 2.3.

Actividad	Tiempo(h)
Cargar alimentación al reactor y agitar	1,5 – 3,0
Calentar hasta la temperatura de reacción	1,0 -2,0
Efectuar la reacción	Variable
Vaciar y limpiare el reactor	0,5 -1,0

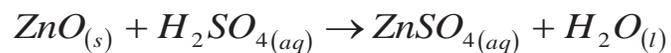
Tabla 2.3 – Tiempos de reacción

2.3 Balance de Energía

2.3.1 Calor Generado por la Reacción

Para una reacción exotérmica a presión constante, la variación de entalpía del sistema es igual a la energía liberada en la reacción.

En este caso, tendremos condiciones de operación a una temperatura de 100°C regido por la siguiente reacción (Ec. 1.1):



Por lo tanto:

$$Q = \Delta H^{100^\circ\text{C}}$$

Donde:

$$\Delta H^{100^\circ\text{C}} = \Delta H^{25^\circ\text{C}}_{\text{RXN}} + \Delta H_{\text{ZnO}}^{100^\circ\text{C}-25^\circ\text{C}} + \Delta H_{\text{H}_2\text{SO}_4}^{100^\circ\text{C}-25^\circ\text{C}} + \Delta H_{\text{ZnSO}_4}^{25^\circ\text{C}-100^\circ\text{C}} + \Delta H_{\text{H}_2\text{O}}^{25^\circ\text{C}-100^\circ\text{C}}$$

Ec. 2.11

La entalpía de reacción es la energía asociada a una reacción, y viene dada por la suma de las entalpías de formación de productos menos la de reactivos según sus coeficientes estequiométricos

$$\Delta H^{25^\circ\text{C}}_{\text{rxn}} = \sum \Delta H_{\text{formación productos}} - \sum \Delta H_{\text{formación reactivos}}$$

Ec. 2.12

Y, la entalpia de cada compuesto viene dado por

$$\Delta H_i = m_i \cdot \int_{T1}^{T2} Cp_i \cdot dT \quad \text{Ec 2.13}$$

2.4.2 Perdida de Calor por Convección Natural

La transferencia de calor por convección se expresa con la “Ley del Enfriamiento de Newton”, donde:

$$Q = h \cdot A \cdot (T_s - T_{amb}) \quad \text{Ec 2.14}$$

h = coeficiente transferencia de calor

A = área de contacto con el fluido

T_s = temperatura de la superficie del cuerpo

T_{amb} = temperatura ambiente

Los coeficientes medios de transferencia de calor por convección natural, pueden representarse con la siguiente forma funcional:

$$Nu = c \cdot (Gr \cdot Pr)^m \quad \text{Ec 2.15}$$

Los números de Nusselt y Grashof en paredes verticales, se forman con la altura de la superficie como longitud característica. Esta transferencia de calor en

cilindros verticales puede calcularse con las mismas relaciones de placas verticales, ya que cumple con que el espesor de la capa límite no sea grande comparado con el diámetro del cilindro, por lo que un cilindro vertical puede tratarse como una placa plana vertical.

2.4.3 Calor necesario para elevar la temperatura de 25 a 100°C

Este calor es calculado a partir de las siguientes ecuaciones:

$$Q = U_d \cdot A_t \cdot \Delta T_{LMTD} \quad \text{Ec 2.16}$$

Donde

Q = calor necesario para elevar la temperatura J/hr)

U_d = coeficiente total de transferencia de calor (J/hr m² °C)

A_t = area transferencia de calor (m²)

ΔT_{LMTD} = diferencia media logarítmica de temperatura (°C)

Además

$$\frac{h_i \cdot D_i}{k} = 0,36 \cdot \left(\frac{L^2 \cdot N \cdot \rho}{\mu} \right)^{2/3} \cdot \left(\frac{Cp \cdot \mu}{k} \right)^{1/3} \cdot \left(\frac{\mu}{\mu_w} \right)^{0,14} \quad \text{Ec 2.17}$$

Donde:

- h_i = coef. Transferencia de calor ($\text{kcal/hr m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$) ($\text{BTU/hr pie}^2 \text{ }^\circ\text{F}$)
- D_i = diámetro interno reactor (m) (pie)
- k = conductividad térmica solución ($\text{kcal/hr m }^\circ\text{C}$) ($\text{BTU/hr pie }^\circ\text{F}$) (Anexo A. Fig.1)
- L = longitud paleta (diámetro agitador) (m) (pie)
- N = velocidad rotación agitador (rph)
- N' = velocidad rotación agitador (rpm)
- ρ = densidad solución al 35,5% (kg/m^3) (lb/pie^3)
- μ = viscosidad solución (kg/m hr) (lb/pie hr)
- μ' = viscosidad solución (kg/m s) (lb/pie s)
- μ_w = viscosidad solución a temperatura de pared (kg/m h) (lb/pie hr)
- C_p = calor específico solución al 35,5% ($\text{kcal/kg }^\circ\text{C}$)($\text{BTU/ lb }^\circ\text{F}$)
- y = altura de la paleta del agitador (m) (pie)
- z = altura del líquido dentro del reactor (m) (pie)
- h_s = altura de la solución
- T_1 = temperatura que entrega el vapor a la presión de trabajo
- t_1, t_2 = temperatura inicial y final de la solución, respectivamente.

3. PROCESO DE OBTENCIÓN DE SULFATO DE ZINC

3.1 Introducción

El punto de partida para el desarrollo de la investigación fue determinar cuáles eran los compuestos químicos presentes en los polvos, para tal efecto se tomaron datos del lugar de donde provienen las muestras de los polvos. Se realizó difracción de Rayos X a los polvos, en SERNAGEOMIN, para identificar cualitativamente los compuestos, es decir, en qué forma química están presentes los elementos encontrados por fluorescencia, siendo los más importantes los señalados por la Tabla 3.1.

Para el Zn	ZnO (Cincita)
Para el Fe	Fe ₃ O ₄ (Magnetita) FeO(OH) (Geotita)
Para el Cu	CuO (Tenorita)

Tabla 3.1

No se identificó compuestos para el As, Sb, Ni y Cd, debido a su bajo contenido. Se observa en la Tabla que el Zn, nuestro elemento de interés está como óxido de Zinc (ZnO) en un estado de oxidación +2. Igualmente todos los otros elementos se encuentran también en estado oxidado, eso nos indica que la solución lixivante requiere tener sólo la capacidad para disolver el óxido de zinc y mantenerlo en solución.

El proceso de obtención de Sulfato de Zinc que utilizamos en este proyecto, se basa en realizar una lixiviación de polvos de horno eléctrico de fundición de cobre

con ácido sulfúrico con un pH bajo, cercano a cero. Este proceso es de tipo batch y cuenta con agitación mecánica.

El proceso consta de tres etapas fundamentales:

- 1.1 Reacción
- 1.2 Filtración
- 1.3 Cristalización

1.1 Reacción, etapa de lixiviación: consiste en lixiviar los polvos de horno eléctrico, con una composición aproximada de 45% Zn, 5,22% de Cu; con ácido sulfúrico H_2SO_4 .

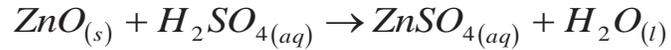
La finalidad es poder obtener concentraciones finales de Zinc cercanas a 327,0 gpl (según los datos obtenidos de las experiencias). Este proceso es realizado a temperaturas cercanas a 80°C a escala de laboratorio y a presión atmosférica.

A escala de laboratorio se obtuvo una serie de valores, que aparecen en la Tabla 3.2, que son utilizados en los balances de masa, energía y en el dimensionamiento de los equipos.

Temperatura operación	80	°C
Presión operación	1	Atm
Masa polvo/ litro de agua	558	gr
ácido utilizado	308	ml
Concentración final obtenida de Zinc	327	gr/lt

Tabla 3.2 – Datos obtenidos.

Es en esta etapa donde se realiza la formación de Sulfato de Zinc, según la siguiente reacción (Ec. 1.2)



1.2 Filtración: consiste en filtrar la solución a presión, con el fin de separar el sólido, de la solución formada en la reacción. El sólido obtenido es retirado como desecho y la solución formada pasa a la etapa de cristalización.

1.3 Cristalización: se realiza en bateas de cristalización, en donde es retenida la solución formada y dejada enfriar hasta la formación de los cristales de $ZnSO_4 \cdot 7H_2O$. En esta etapa se le agrega a la batea ácido sulfúrico para maximizar la formación de cristales, y la solución restante se recircula en la alimentación del próximo batch.

3.2 Descripción general de proceso

Nuestro enfoque parte de la premisa de encontrar los parámetros operacionales para lixiviar selectivamente el polvo, a fin de extraer el máximo de Zn con una mínima extracción de los otros elementos. Para encontrar estos parámetros, se realizaron una serie de pruebas exploratorias, a escala de laboratorio, buscando la relación óptima entre los moles de Oxido de Zinc alimentados y los moles de ácido sulfúrico necesarios para la lixiviación.

En este proceso la materia prima son polvos de hornos eléctricos de fundición de cobre.

La lixiviación en régimen, del óxido de zinc se realizará en un reactor batch de 10 m³, el cual cuenta con agitación mecánica a 200 rpm, usando un 75% del volumen disponible del reactor.

Se considera tratar 100 ton/mes de polvo, obteniendo una producción de 197[Ton/mes] de ZnSO₄*7H₂O aproximadamente.

La alimentación de los reactivos se produce a temperatura ambiente, y para que esta alcance la temperatura de operación de 100°C, se aprovecha la liberación de energía de la reacción exotérmica, y también se entrega calor por medio de la circulación de vapor a través de la chaqueta que posee el reactor.

Una vez terminada la reacción, que toma un tiempo mínimo aproximado de 2 hrs., la solución resultante es enviada al filtro por medio de bombas, donde es separada de la masa que no reaccionó, alcanzando una concentración final de 327 gpl de Zinc y 14,4 gpl de Cobre.

La solución que sale del filtro es trasladada a las bateas en donde se agrega ácido sulfúrico, para maximizar la cristalización de Sulfato Heptahidratado, dejando enfriar a temperatura ambiente. La solución que no forma cristales, es recirculada al siguiente batch como alimentación.

La masa no reaccionante es retirada como desecho.

3.3 Disposición de Residuos Finales

Los residuos, son obtenidos al terminar el proceso de filtración, los cuales al poseer concentraciones de metales pesados como Arsénico, Cobre, Hierro entre otros; se consideran como material peligroso que deben ser dispuestas por las Fundiciones de Cobre de acuerdo a las normas ambientales vigentes.

Estos residuos deben ser retirados por una empresa que disponga de ellos para evitar cualquier tipo de contaminación.

Con el proceso de lixiviación de este proyecto, se disminuye la cantidad de material peligroso a disponer con lo que se disminuye el gasto asociado al retiro de los residuos y obteniéndose además un ingreso por la venta del sulfato de zinc heptahidratado obtenido.

4. DIMENSIONAMIENTO DE LOS EQUIPOS PRINCIPALES

4.1 Reactor

Para dimensionar el volumen del reactor, similar al de la Ilustración 4.1, se consideró la cantidad de mineral a tratar correspondiente a 100 Ton/mes aproximadamente.

Basándonos en las experiencias hechas a escala en el laboratorio, se trataron 558 gr de mineral por litro de agua. En esta lixiviación se usaron 308 ml de ácido sulfúrico, y se dejó reaccionar por 4 horas, lo que da origen al agua madre.

Los valores para la cantidad industrial a tratar son escalados a partir de los datos obtenidos en el balance de masa, Ilustración 5.3, para el sistema en régimen.

Se contempla tratar 3,3 Ton/batch de mineral para obtener una producción de aproximadamente 6,6 Ton/batch de Sulfato Heptahidratado.

El volumen del reactor se relaciona con el volumen que ocupa la solución resultante entre el mineral, agua fresca y agua madres de recirculación. Esto lo podemos resumir en:

$$V_R = V_S + V_f + V_a \text{ (Anexo B)}$$

V_S = Volumen solución

V_a = volumen agua madre

V_f = volumen agua fresca

V_R = volumen reactor

Por lo tanto el volumen del reactor queda determinado por:

$$V_R = 7.766 \left(\frac{Lt}{dia} \right)$$

Sobredimensionamiento del 25%, quedando un volumen real:

$$V_R = 10 \left(\frac{m^3}{dia} \right)$$

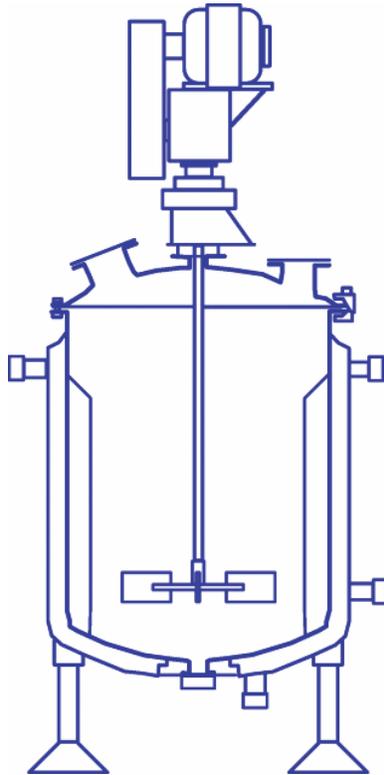


Ilustración 4.1 - Reactor

4.2 Filtro

La filtración se realizó utilizando el filtro a presión del LOU, a una presión de operación de 10 psi, lo que tomaba un tiempo de 4 minutos y 10 segundos.

Para obtener el área de filtrado se tomaron en cuenta las características del filtro utilizado.

Diámetro filtro = 20 cm

Con este diámetro tenemos un área = 0,0314 m

Para obtener los m² de superficie que necesitamos debemos calcular los $\frac{m^3}{m^2_{superficie} \cdot h}$, los que se obtienen realizando la siguiente operación:

$$\frac{l_{recuperada} \cdot 3600}{1000 \cdot tiempo(seg) \cdot \text{área}_{filtro}}$$

La que nos da como resultado 0,69 m³/m² h.

Esto genera la Tabla 4.1 en la cual vemos la capacidad que debe tener el filtro y el tiempo que tardaría la filtración.

Tiempo (horas)	m ² superficie
1	14,5
2	7,3
3	4,8

Tabla 4.1 – Superficie de Filtro

Esto nos lleva a la conclusión de que para filtrar un volumen de 10 m^3 , en una hora necesitamos un filtro para $14,5 \text{ m}^2$.

4.3 Batea o Cristalizador

El dimensionamiento de la batea depende de la cantidad de solución de sulfato que sale desde el filtro.

De la experimentación, sabemos que del filtro obtenemos una corriente líquida, la cual tiene una concentración de 327 gramos de Zn^{+2} por cada litro de agua.

Por lo determinado en el balance de masa, Capítulo 5.2; tenemos

$0,77 \left[\frac{\text{Lt}_{\text{SOLUCION}}}{\text{Kg}_{\text{AGUA}}} \right]$, lo que corresponde a 5870 Litros de solución.

Se aproxima el volumen a 6000 Litros, y con el factor de sobredimensionamiento tenemos que el volumen real de batea será

$$V_{\text{RealBatea}} = \frac{V_{\text{batea}}}{0,75}$$

$$V_{\text{RealBatea}} = 8(\text{m}^3)$$

4.4 Centrifuga

Según los datos obtenidos del balance de masa, debemos centrifugar 6.592 Kg/batch de cristales de $ZnSO_4 \cdot 7H_2O$.

Para esto nos sirve una centrifuga de productividad de entre 2-8 m³/hr. Similar a las que aparece en la Ilustración 4.2:

modelos	Diámetro de la cesta (milímetros)	Índice de la rotación de la cesta (r/min)	Fuerza centrífuga relativa	Productividad m ³ /h	Energía del motor (kilovatios)	Peso (kilogramo)	Dimensiones totales (l*w*h) (milímetros)
LLW320	320	2630	1240	1-5	7.5	700	1350*1050*1000
LLW350	350	3000	1770	2-8	11	1000	1400*1250*1150
LLW400	400	2750	1700	3-10	15	1300	1500*1350*1250
LLW450	450	2500	1580	5-15	22	1500	1600*1400*1300
LLW530	530	2000	1190	8-20	30	2000	1700*1450*1400
LLW630	630	1800	1140	10-30	37-45	2500	1980*1440*1740
LLW800	800	1400	870	15-50	55-75	4000	2300*2200*1750
LLW1000	1000	950	500	20-80	75-90	6000	3000*2400*2300
LLW1200	1200	780	400	30-100	90-110	8000	3200*2800*2600

Ilustración 4.2 - Modelos centrifugas

5. BALANCE DE MASA

Las experiencias se hicieron a escala de laboratorio, y los resultados se escalaron para tratar 100 Ton/mes. Para cumplir dicha meta se debe tratar 3,3 Ton/batch de polvo en régimen, cálculos mostrados en el Anexo B, Memoria de Cálculo.

5.1 Reactor

La masa a tratar es de 3.333,33 Kg de polvos. La cantidad de óxido de zinc presente corresponde aproximadamente al 45% en peso.

5.1.1 Condiciones Operación

INICIAL	
Temperatura	80°C
Presión	Atmosférica
Masa Polvo	3.333,3 Kg
Zn	45,0%
Cu	5,22%
Agua	5.973,7 Lt

Tabla 5.1 – Condiciones Operación

La cantidad de ácido fue obtenida de las pruebas exploratorias, Anexo A, las cuales dieron como resultado óptimo una relación molar entre el Oxido de Zinc y el Acido Sulfúrico de:

$$1,84 \cdot n_{H_2SO_4} = n_{ZnO} \quad \text{Ec 5.1}$$

Donde:

$$n_i = \frac{gr_i}{PM_i} \quad \text{Ec. 5.2}$$

n = moles compuesto i

gr = gramos compuesto i

PM = peso molecular i

Luego de 4 horas de reacción se obtienen los siguientes datos:

FINAL	
Volumen recuperado de la solución	4.474,3 Lt
Masa polvo residual	1.839,9 Kg
Zn	36,06 Kg
Cu	82,8 Kg
Concentración en gpl (gramos/litro)	
Zn	327,00
Cu	14,44

Tabla 5.2 - Datos

5.1.2 Balance para el Zinc y el Cobre

Con los datos obtenidos, realizamos el balance de masa para el Zinc y el Cobre presentes en la reacción.

Al tener las masas iniciales y finales, la cantidad final de Zinc y Cobre en la solución y el volumen final de esta, tenemos:

$$gr_{solucion} = \frac{gpl_{mu\text{stra_final}}}{V_{solucion_soluci\text{on}}} \quad \text{Ec.5.3}$$

No se determinó el contenido de Zn y Cu de los rípios, su contenido se estimó mediante el balance de materia

$$\textit{Masa en los rípios} = \textit{Masa en los polvos} - \textit{Masa en Solucion}$$

Ec. 5.4

El balance queda resumido en la Tabla 5.3 y Tabla 5.4

BM Zn	Kg iniciales	1500	Volumen solución (lt)	4474,3
	Kg en solución	1.463		
	Kg en rípios	37		

Tabla 5.3– Balance de Masa Zn

BM Cu	Kg inicial	174,00	Volumen solución (lt)	4474,3
	Kg en solución	65		
	Kg en rípios	109		

Tabla 5.4 – Balance de masa Cu

5.2 Batea o Cristalizador

La solución obtenida del filtro, es llevada hasta una batea, en donde se producirá la cristalización. En esta etapa se agrega ácido sulfúrico de forma directa a la batea para así maximizar la formación de cristales, y la solución restante será devuelta al reactor para su posterior reacción con el siguiente batch.

5.2.1 Balance Cristalizador en Régimen

Entran al reactor en régimen 1500 Kg de Zn^{+2} , y queremos cristalizar la máxima cantidad de zinc, es decir 1500 Kg. Supondremos que en el filtro no existen pérdidas y sale todo el zinc en la solución.

El circuito en régimen, tiene un remanente, agua madre (Anexo B, punto 3), quien es el que se recircula en el proceso hacia el reactor y este contiene lo siguiente, mostrado en la Tabla 5.5:

Zn^{+2}	537	Kg
H_2SO_4	2265	Kg
Agua	4734	Kg

Tabla 5.5

Por lo tanto, al reactor es necesario alimentar la cantidad de agua y zinc cristalizado como $ZnSO_4 \cdot 7H_2O$, como se muestra en la ilustración 5.3. El ácido necesario a agregar, debido al consumo en la formación de cristal, es agregado no en el reactor, sino que directamente en el cristalizador. Se toma esta medida ya que por efecto de ion común al aumentar la cantidad de ion SO_4^{-2} maximizamos la

cantidad a precipitar de Zn^{+2} (Anexo B, punto 7), como se aprecia en las Ilustraciones 5.1 y 5.2

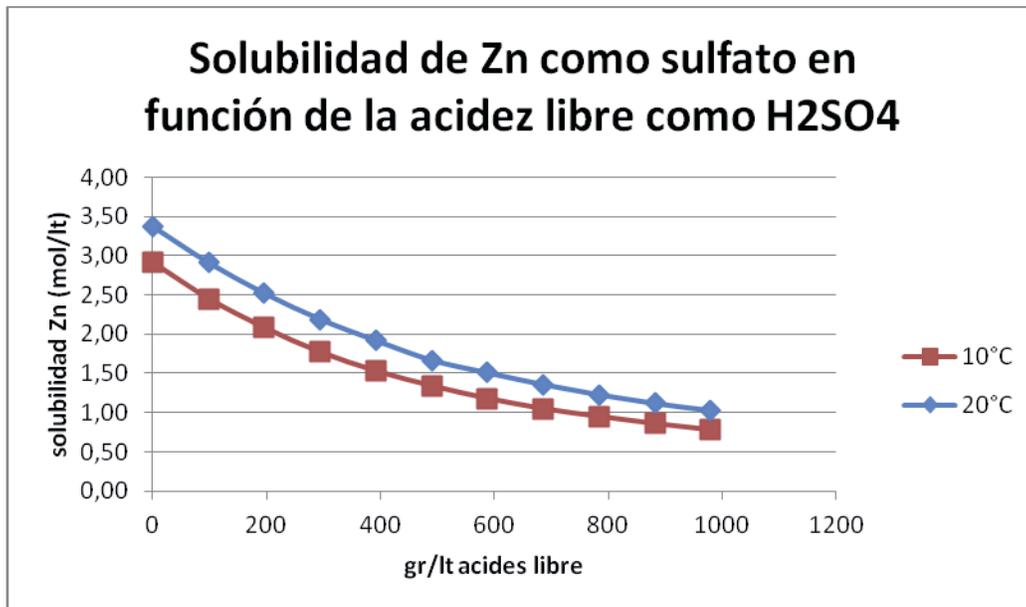


Ilustración 5.1

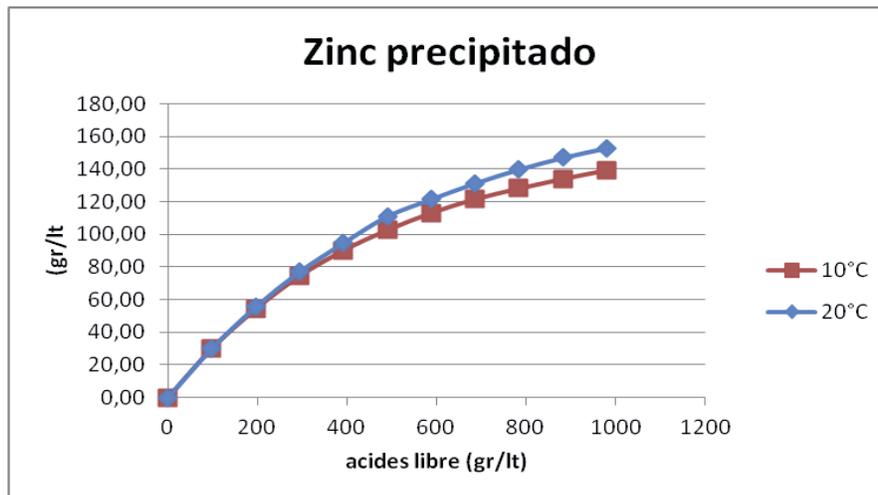


Ilustración 5.2

La concentración de acidez libre en el reactor es de:

$$\frac{\text{Ácido remanente no reaccionante (Kg)}}{\text{volumen de agua (Lt)}}$$

$$\frac{2265 \text{ Kg}}{2890 + 4734 \text{ Kg}} = 297,08 \text{ gpl}$$

La concentración de acides libre en el cristalizador es de:

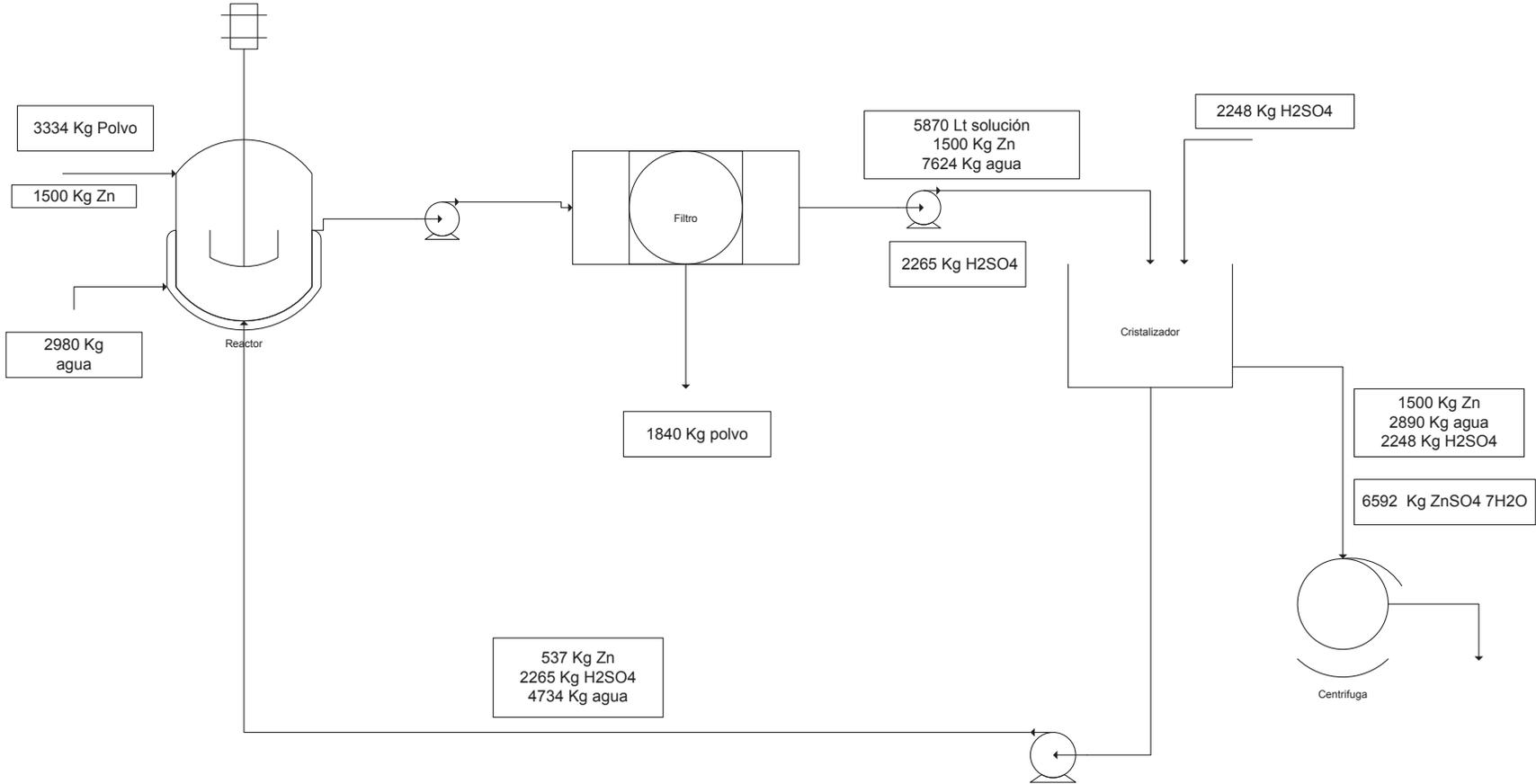
$$\frac{\text{Ácido remanente no reaccionante (Kg)}}{\text{volumen de agua (Lt)}}$$

$$\frac{2.265 \text{ Kg}}{2.890 \text{ Kg}} = 478,45 \text{ gpl}$$

Analizando las curvas con la acides libre obtenida en cada caso, podemos apreciar que es más eficiente agregar el ácido en el cristalizador, ya que la cantidad de zinc a precipitar como sulfato heptahidratado es mucho mayor.

Pero debemos tener cuidado con la concentración de acides libre en contacto con polvo, ya que, si esta es demasiado alta comenzaremos a disolver otras sustancias que no queremos que aparezcan.

5.3 Diagrama de Flujo y Balance de masa general en régimen.



5.3 Ilustracion – Diagrama de Flujo

6. BALANCE DE ENERGIA

6.1 Reactor

Como la reacción entre el óxido de zinc y el ácido sulfúrico es una reacción exotérmica, usaremos este calor generado para aumentar la temperatura de operación.

La espontaneidad de la reacción viene expresada por la Energía libre de Gibbs ($\Delta G < 0$), obtenida desde HSC Chemistry, como se muestra en la Ilustración 6.1.

ZnO + H2SO4(l) = ZnSO4(a) + H2O			
T	deltaH	deltaS	deltaG
C	kcal	cal/K	kcal
0,000	-47,367	-60,090	-30,953
10,000	-46,167	-55,681	-30,401
20,000	-46,409	-56,523	-29,840
30,000	-46,658	-57,357	-29,270
40,000	-46,913	-58,184	-28,693
50,000	-47,173	-59,001	-28,107
60,000	-47,438	-59,809	-27,513
70,000	-47,708	-60,607	-26,911
80,000	-47,982	-61,394	-26,301
90,000	-48,260	-62,170	-25,683
100,000	-48,541	-62,934	-25,057

Ilustración 6.1

6.1.1 Calor Generado por la Reacción

Para saber el calor generado por la reacción, utilizaremos las ecuaciones 2.11, 2.12 y 2.13 respectivamente:

$$\Delta H^{100^{\circ}C} = \Delta H^{25^{\circ}C}_{RXN} + \Delta H_{ZnO}^{100^{\circ}C-25^{\circ}C} + \Delta H_{H_2SO_4}^{100^{\circ}C-25^{\circ}C} + \Delta H_{ZnSO_4}^{25^{\circ}C-100^{\circ}C} + \Delta H_{H_2O}^{25^{\circ}C-100^{\circ}C}$$

Ec 2.11

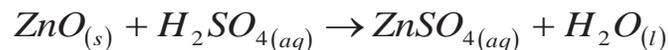
$$\Delta H^{25^{\circ}C}_{rxn} = \sum \Delta H_{formación\ productos} - \sum \Delta H_{formación\ reactivos}$$

Ec 2.12

$$\Delta H_i = m_i \cdot \int_{T1}^{T2} Cp_i \cdot dT$$

Ec 2.13

La reacción involucrada en el proceso es:



Por lo que, la entalpia de formación de los compuestos involucrados es la que se muestra en la Tabla 6.1 (Fuente: Perry “Manual del Ingeniero Químico”)

ΔH formación (25°)	ZnO (81,38 gr/mol)	H ₂ SO ₄ (98 gr/mol)	ZnSO ₄ (161,43 gr/mol)	H ₂ O (18 gr/mol)
Kcal/mol	-83,36	-212,03	-252,12	-68,32
Kcal/Kg	-1024,34	-2161,96	-1561,7	-3792,25

Tabla 6.1 – Calores de Formación

Lo que da como resultado

$$\Delta H^{25^{\circ}C}_{rxn} = -2167,66 \left[\frac{Kcal}{Kg} \right]$$

Las entalpias de cada compuesto, según la Ec.2.13, serán: (Fuente: HSC Chemistry)

$$\Delta H_{ZnO} = \int_{100}^{25} C_{p_{ZnO}} \cdot dT$$

$$\Delta H_{ZnO} = -9,696 \left[\frac{Kcal}{Kg} \right]$$

$$\Delta H_{H_2SO_4} = \int_{100}^{25} C_{p_{H_2SO_4}} \cdot dT$$

$$\Delta H_{H_2SO_4} = -57,686 \left[\frac{Kcal}{Kg} \right]$$

$$\Delta H_{ZnSO_4} = \int_{25}^{100} C_{p_{ZnSO_4}} \cdot dT$$

$$\Delta H_{ZnSO_4} = 13,009 \left[\frac{Kcal}{Kg} \right]$$

$$\Delta H_{H_2O} = \int_{25}^{100} C_{p_{H_2O}} \cdot dT$$

$$\Delta H_{H_2O} = 81,565 \left[\frac{Kcal}{Kg} \right]$$

Lo que da como resultado:

$$Q = \Delta H^{100^\circ C} = -2140,469 \left[\frac{Kcal}{Kg} \right]$$

$$Q = \Delta H^{100^\circ C} = -8961,7 \left[\frac{KJ}{Kg} \right]$$

En este caso se define aprovechar el calor generado por la reacción, por tanto se requiere aislar el reactor. Además cuando es necesario, se administra vapor de agua a través de la chaqueta que posee el reactor, para así alcanzar la temperatura de operación que será de 100°C.

6.1.2 Calor perdido por el reactor a través de Convección Natural

La pérdida de calor es calculada por medio de la Ec.2.14:

$$Q = h \cdot A \cdot (T_s - T_{amb})$$

Podemos obtener el coeficiente de transferencia a partir de los números de Nusselt, Grashof y Prandtl.

$$Nú = h \cdot \frac{L}{k} \quad \text{Ec 6.1}$$

$$Gr = \frac{g \cdot \beta \cdot (T_s - T_a) \cdot L^3}{\nu^2} \quad \text{Ec 6.2}$$

$$Pr = \frac{C_p \cdot \mu}{k} \quad \text{Ec 6.3}$$

Lo que nos lleva a tener

Propiedades aire 25°C		
Densidad (kg/m ³)	ρ	1,18
viscosidad (cp)	μ	0,018
viscosidad (Kg/(m*s))	μ	0,000018
viscosidad cinematica (m ² /s)	ν	1,52542E-05
conductividad termica (W/(m*K))	κ	0,024
conductividad termica (KJ/(s*m*K))	κ	0,000024
coef. Expansión termica (1/°C)	β	3,41E-06
Gravedad (m/s ²)	g	9,8
temperatura superficie (°C)	Ts	40
temperatura ambiente (°C)	Ta	25
longitud caracteristica (m)	L	2,96
capacidad calorifica (KJ/(Kg*°C))	Cp	1,012

Tabla 6.2 – Propiedades aire

Para la obtención del número de Nusselt a partir de Grashof y Prandtl, usamos los valores indicados en la Tabla 6.3:

Geometría	$Gr_f Pr_f$	C	M
Planos y cilindros verticales	$10^4 - 10^9$	0,59	1/4
	$10^9 - 10^{13}$	0,021	2/5

Tabla 6.3 – Tabla de valores, Convección natural - Transferencia de Calor, J.P. Holman

Las dimensiones del reactor (Ec. 4.2) son:

N° reactores	1	eleccion de D	
V(m ³)	10	D(m)	1,97
		h(m)	3,90

Tabla 6.4 – Dimensiones Reactor

Lo que nos entrega un Área de trasferencia,

$$A = 3,05 \text{ m}^2$$

Con lo cual se obtiene como resultado, los valores que se encuentran en la Tabla 6,5:

Resultados	
Gr	6376500,957
Pr	0,759
Gr*Pr	4,84E+06
con esto busco en la tabla 7.1 y busco C y m	
C	0,59
m	¼
Nú	27,673
h (W/m ² *K)	0,224
h (J/s*m ² *K)	0,192929162
Q (KJ/hr)	36,9
Q (Kcal/hr)	8,82

Tabla 6.5 – Convección Natural

Como la reacción tendrá un tiempo a escala real, de 2 horas, tenemos un calor total perdido de:

$$Q = 17,64 \text{ kcal}$$

$$Q = 73,8 \text{ kJ}$$

6.1.3 Calor necesario para elevar la temperatura de 25 a 100°C

Como será necesario elevar la temperatura de la solución para llevar a cabo la reacción, se utilizara la chaqueta de del reactor por la cual circulara vapor de agua a 100 psia, el cual proporcionara la energía necesaria.

Este calor es calculado a partir de las ecuaciones:

$$Q = Ud \cdot A_t \cdot \Delta T_{LMTD} \quad \text{Ec 2.16}$$

Además

$$\frac{h_i \cdot D_i}{k} = 0,36 \cdot \left(\frac{L^2 \cdot N \cdot \rho}{\mu} \right)^{2/3} \cdot \left(\frac{Cp \cdot \mu}{k} \right)^{1/3} \cdot \left(\frac{\mu}{\mu_w} \right)^{0,14} \quad \text{Ec 2.17}$$

Como la temperatura en el centro se considera igual a la temperatura de la pared, tendremos:

$$\left(\frac{\mu}{\mu_w} \right)^{0,14} = 1$$

Considerando para el vapor de agua, $h_{i0} = 1500$ (Btu/hr pie² °F) y $Rd = 0,001$

Además usaremos una agitación de 200 rpm.

Con esto obtenemos los siguientes valores, que fueron calculados en el Anexo B, punto 5:

$$h_i = 31,18 \left[\frac{Btu}{hr \cdot pie^2 \cdot ^\circ F} \right]$$

$$h_i = 152,2 \left[\frac{kcal}{hr \cdot m^2 \cdot ^\circ C} \right]$$

Por lo tanto, también tenemos:

$$\frac{1}{U_c} = \frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_{i0}} \quad \text{Ec 6.4}$$

$$U_c = 30,55 \left(\frac{Btu}{hr \cdot pie^2 \cdot ^\circ F} \right)$$

$$U_c = 149,15 \left(\frac{kcal}{hr \cdot m^2 \cdot ^\circ C} \right)$$

Por lo tanto:

$$\frac{1}{U_d} = \frac{1}{U_c} + Rd \quad \text{Ec 6.5}$$

$$U_d = 29,64 \left(\frac{Btu}{hr \cdot pie^2 \cdot ^\circ F} \right)$$

$$U_d = 144,7 \left(\frac{kcal}{hr \cdot m^2 \cdot ^\circ C} \right)$$

Además tenemos el área de transferencia, según:

$$A_t = 2 \cdot \pi \cdot r_i \cdot h_s + \pi \cdot r_i \cdot \sqrt{r_i^2 + h_{cono}^2} \quad \text{Ec 6.6}$$

$$A_t = 199,5 (pie^2)$$

$$A_t = 18,53 (m^2)$$

Y el ΔT_{LMTD} es:

$$\Delta T_{LMTD} = \frac{(T_1 - t_1) - (T_1 - t_2)}{\ln\left(\frac{T_1 - t_1}{T_1 - t_2}\right)} \quad \text{Ec 6.7}$$

$$\Delta T_{LMTD} = 150,5(^{\circ}F)$$

$$\Delta T_{LMTD} = 65,8(^{\circ}C)$$

Por lo tanto el calor necesario para elevar la temperatura de 25°C (77°F) a 100°C

(212°F) es:

$$Q = 8,9 \cdot 10^5 \left(\frac{Btu}{hr} \right)$$

$$Q = 2,24 \cdot 10^5 \left(\frac{kcal}{hr} \right)$$

Y el

tiempo que tarda el calentamiento de la solución se determina según:

$$\tau = \frac{M \cdot Cp_f}{U_d \cdot A_t} \cdot \ln\left[\frac{T_1 - t_1}{T_2 - t_2} \right] \quad \text{Ec 6.8}$$

$$\tau = 3,2hr$$

Donde:

M = masa fluido frío. (Obtenida del Balance de Masa, masa agregada al reactor)

C_{p_f} = capacidad calorífica de la solución fría

t_1 y t_2 = temperatura inicial y temperatura final solución fría.

7. ESTIMACIÓN DE COSTOS

7.1 Costos de inversión

La inversión es el gasto monetario en la adquisición de capital fijo o capital circulante.

Aunque también se puede definir como la actividad económica por la cual se renuncia a consumir hoy con la idea de aumentar la producción a futuro. Por otro lado, también se dice que "es gastar dinero con la esperanza de obtener utilidades".

Para obtener el valor de la inversión total, es necesario conocer el capital fijo, capital de trabajo y los gastos de puesta en marcha.

7.1.1 Capital Fijo

El capital fijo son las inversiones necesarias para los equipos y su instalación, y los gastos necesarios para que la planta quede en condiciones de operar. El capital fijo lo dividimos en capital fijo depreciable y no depreciable.

7.1.1.1 Capital Fijo depreciable

Este capital considera los siguientes ítems:

- Costos Equipos
- Cañerías
- Instrumentación
- Instalaciones eléctricas
- Aislamiento y pintura
- Servicios generales y mejoras.

Costos equipos

La estimación será en base a los costos de los equipos principales que componen la planta, se realiza mediante la cotización de los mismos en forma directa con los fabricantes o bibliografía dedicada al tema de estimación de equipos.

Los precios de obtuvieron desde “*www.matche.com*”, página que ofrece servicios de cotizaciones para la evolución de proyectos con fines de investigación y desarrollo de productos. Los datos obtenidos están vasados en el año 2007, por lo cual mediante el método de índices de costos de equipos se realiza la corrección (Anexo B, punto 7)

Este método actualiza los precios según lo siguiente:

$$Costo2 = Costo1 \cdot \frac{Indice2}{Indice1} \quad Ec.7.1$$

Donde:

Costo 2= costo equipo en el presente

Costo 1= costo equipo en el pasado

Índice 2= costo indexado en el presente

Índice 1= costo indexado en el pasado

Total Equipos US\$ = 330870

Costos Instrumentación

Este es estimado en un 6%, como mínimo del costo de los equipos, debido a la instrumentación básica requerida por la planta.

Instrumentación US\$ = 23161

Costos Instalaciones

Incluye la aislación y pintura. Se considera 30% del costo total de los equipos.

Instalaciones US\$ = 99261

Costos Instalaciones eléctricas

Se considera 10% del costo de los equipos.

Instalaciones eléctricas US\$ = 33087

Costos Servicios generales y mejoras

Se considera un 45% del costo de los equipos. Es considerado la preparación del terreno (Fundación, etc.)

Servicios generales y mejoras US\$ =148892

Costos Cañerías

Se considerará un 4% del costo de los equipos.

Cañerías US\$ = 13235

Por lo tanto, el Capital Fijo Depreciable total es:

Total Capital Fijo Depreciable US\$ = 648505

7.1.1.2 Capital Fijo no depreciable

Es un bien tangible que tiene la característica económica de generar un flujo de ingreso o beneficio futuro a su propietario, y que está sujeto a una devaluación en el tiempo, la cual se determina por su uso y/o antigüedad o velocidad de obsolescencia.

Como capital fijo no depreciable se considera los siguientes ítems:

- Costos ingeniería
- Imprevistos y contingencias

Costos ingeniería

Se consideran el 10% del capital fijo depreciable.

Costos Ingeniería US\$ = 64851

Imprevistos y contingencias

Se considera el 8% del capital fijo depreciable.

Costos Imprevistos y contingencias US\$ = 51880

Por lo tanto el capital fijo No depreciable es:

Total Capital Fijo No Depreciable US\$ = 116731

Finalmente, El capital fijo Total es:

Total Capital Fijo US\$ = 765236

7.1.2 Capital de Trabajo

Son aquellos recursos que requiere la empresa para poder operar. En este sentido el capital de trabajo es lo que comúnmente se conoce como activo corriente. (Efectivo, inversiones a corto plazo, cartera e inventarios), bienes tangibles o intangibles que se acumulan para asegurar el normal desarrollo del proceso productivo, los cuales son capaces de permitir el dar vuelta el ciclo productivo.

Si bien existen métodos más exactos para la determinación del capital de trabajo, para este proyecto se estimara como el 18% del Capital Fijo.

Capital de Trabajo US\$ = 137743

7.1.3 Gastos de Puesta en Marcha

Estos gastos se estiman como un 10% del Capital Fijo.

Puesta en Marcha US\$ = 76524

Por lo tanto la inversión Total de la planta es:

Costos	US\$
--------	------

Capital Fijo	765236
Capital de Trabajo	137743
Puesta en Marcha	76524
Inversión Total	979503

Tabla 7.1 – Capital Fijo

7.2 Costo Total del producto

Este costo es la suma de todos los costos involucrados desde el punto de partida de la fabricación en planta hasta su colocación en el mercado.

- Costos Operación o Producción
- Gastos Generales de la Empresa

7.2.1 Costos de Producción o de Operación

Son todos los gastos asociados con la operación producción de la planta. Estos gastos se dividen en:

- Costos Directos de Operación o Costos Variables
- Costos Indirectos o Costos Fijos
- Gastos Generales de Planta

7.2.1.1 Costos Directos de Operación

Se incluyen todos los gastos asociados con la operación de la planta. Comprenden: materias primas, sueldos de personal, reparación y mantención, suministros de operación, servicios.

- **Materias Primas**

En este caso se considera como materia prima el polvo residual de los hornos eléctricos y el ácido sulfúrico utilizado. El polvo de horno eléctrico tiene un valor de costo de 0, ya que es un residuo de proceso.

Materias Primas	Ton/mes	US\$/ Ton	US\$/mes
Polvos	100	0	0
Acido sulfúrico	9,96	133,9	1333,6
Total			1333,6

Tabla 7.2 – Materias Primas

- **Mano de Obra**

En este punto se detallarán los sueldos por cargo desempeñado en la planta, y las cantidades de personas que se requieren. En este caso hablamos de un turno.

Sueldos por cargo en la planta				
Cargo	Profesión	N° personas por turno	US\$ por mes	US\$ por año
Jefe de turno	Operador calificado	1	2000	20000
Operador	Medios Completos	2	1000	10000

Tabla 7.3 – Mano de Obra

- Servicios Generales

Se considera agua de proceso y servicios básicos, electricidad para servicios básicos, gas y combustible para la caldera, aire comprimido, etc. Este costo se estima como el 10% del costo total del producto.

- Supervisión

Se considera el 20% del sueldo del personal de la planta

- Mantenimiento y Reparación

Se considera un 4% del capital fijo.

- Suministro de Operación

Se considera un 12% del costo de mantenimiento y reparación.

Por lo tanto los Costos Directos de Operación son:

Costos Directos Operación US\$ = 83142

7.2.1.2 Costos Indirectos de Operación

Son gastos que siempre están presentes aunque la planta esté parada, no depende de la cantidad producida. Los costos de este tipo más importantes son:

- Seguros

Las diversas instalaciones de una fabrica (equipos, edificios, etc.) deben asegurarse, contra posibles riesgos de accidente, incendios, etc. Para los

equipos y maquinarias en condiciones normales de operación, estas primas se estiman en 0,45% del capital fijo invertido.

- Depreciación

Los elementos que constituyen una fabrica sufren pérdida de su valor inicial a medida que transcurre el tiempo, se hace necesario reponer los equipos más antiguos y reemplazarlos por otros más modernos. Por lo general se asume una vida útil de los equipos de 10 años y para los edificios de 20 años, y una depreciación lineal con valor igual al 10% del valor inicial.

$$Depreciación = \frac{V_0eq - V_Req}{Vutil}$$

V_0eq = Valor inicial Equipamiento

V_Req = Valor Residual Equipamiento

$Vutil$ = Vida útil

Por lo tanto los Costos Indirectos de Operación son:

Costos Indirectos Operación US\$ = 37495

7.2.1.3 Gastos Generales de la Planta

Estos gastos no están incluidos en los anteriores, y tienen relación directa con la operación de la planta y no deben confundirse don los gastos generales de una empresa. Estos gastos se estiman en un 40% de los costos que suman los sueldos del personal de operación y jefes de turno.

- Servicios de Ingeniería
- Recepción, envasado y despacho
- Almacenamiento
- Iluminación
- Transporte

Gastos Generales de la Planta US\$ = 12000

Por lo tanto:

Total Gastos de Operación y Producción US\$ = 132636

7.3 Gastos Generales de la Empresa

Son todos aquellos, fuera de los de operación, necesarios para llevar el producto al mercado. Se incluyen los gastos de administración, distribución y ventas, y los gastos financieros.

7.3.1 Gastos de Distribución y Venta

Se considera en un 10% del costo de operación o producción. Este punto considera almacenaje y bodega, despacho, fletes, propaganda, comisiones por venta y asistencia post-venta.

Gastos Distribución y venta US\$ = 13264

7.3.2 Gastos generales Administración

Se considera en un 10% del costo de operación o producción.

Gastos Administración US\$ = 13264

Por lo tanto:

Total Gastos generales de la empresa US\$= 26528

Tabla 7.4 Resumen Costo Total del Producto

Gastos Total	US\$
Gastos de Operación y Producción	132636
Gastos generales de la empresa	26528
Costo total producto	159164

Tabla 7.4 - Costo Total del Producto

8. FLUJO DE CAJA

Constituye un indicador importante de la liquidez de una empresa o un proyecto, ya que corresponde a la acumulación neta de activos líquidos en un periodo determinado. Esta circulación de dinero involucra los ingresos y egresos, separando las utilidades y depreciación, las que son acumuladas como ítems aparte y que constituyen la base para juzgar la rentabilidad de una industria y/o proyecto.

8.1 Cálculo Flujo de Caja

A partir de los ingresos netos se calcula el flujo de caja. Los ingresos netos son aquellos percibidos por efectos de las ventas del producto elaborado.

La diferencia entre los ingresos netos y los gastos anuales de operación recibe el nombre de Ingreso o Margen Operacional, está constituida por la suma de las depreciaciones y la utilidad bruta. Por esta razón para obtener la utilidad neta, debe desconectarse a la utilidad bruta, las depreciaciones y los intereses pagados por la deuda adquirida, para obtener la utilidad afecta a impuestos (equivalentes a un 17%). Al aplicar los correspondientes impuestos, queda un remanente denominado utilidad neta.

Para obtener el flujo de caja anual, a la utilidad neta debe sumarse las depreciaciones y el valor residual de las instalaciones, restarse la amortización de la deuda. La razón de que la depreciación regresa a los fondos de la firma y no sale al exterior acompañado a los otros gastos, es debido a que es un costo de tipo interno y por lo tanto debe quedar dentro de la empresa para absorber el desgaste de los equipos.

En este caso se utilizara un valor residual de 0, que es lo usual que ocupan los métodos de depreciación corrientes.

El procedimiento descrito anteriormente se describe en la siguiente tabla:

+	Ingresos por venta
Σ	INGRESOS NETOS
-	Costos totales de producción
Σ	MARGEN OPERACIONAL
-	Interés deuda
-	Depreciación
Σ	UTILIDAD AFECTA A IMPUESTOS
-	Impuestos (17%)
Σ	UTILIDAD NETA
+	Depreciación
-	Amortización deuda
+	Valor residual
Σ	FLUJO DE CAJA

Tabla 8.1 – Flujo de Caja

8.2 Cálculo del Valor Actual Neto (VAN)

Este método de evaluación de la rentabilidad de un proyecto tiene un buen grado de exactitud, porque en él se considera el valor del dinero en el tiempo, o sea que 1US\$ de hoy vale más que uno en varios años más, sin considerar la inflación, ya que ese dinero puede devengar intereses en el futuro. Para actualizar a la fecha esas futuras rentabilidades del dinero, o flujos de caja, se aplican tasa de descuento.

En el caso de una planta industrial, si se actualizan a la fecha del comienzo del proyecto (tiempo cero) los beneficios netos de cada año y se asumen, se tendrá el valor presente del proyecto, el cual ésta dado por la relación:

$$VAN = FC_0 + \left(\frac{FC_1}{(1+i)^1} + \frac{FC_2}{(1+i)^2} + \dots + \frac{FC_n}{(1+i)^n} \right) \quad \text{Ec 8.1}$$

FC_0 = Flujo Caja año 0

FC_1 = Flujo Caja año 1

FC_n = Flujo Caja año "n"

i = tasa interés

La tasa de interés será fijada de acuerdo al valor correspondiente a las tasas que prevalecen en el mercado, o a los límites prefijados por la compañía.

En el caso de resultar positivo el VAN el proyecto puede ser considerado como conveniente.

Se tomara como precio de referencia, el valor que posee este producto en China, cuyo valor es de 440 US\$/Ton.

Se muestran a continuación los Flujos de Caja con un 100% de Capital Propio, para 10 y 5 años.

Tabla 8.2 Flujo de caja periodo 10 años

		Años										
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	Ingresos por venta		711936	711936	711936	711936	711936	711936	711936	711936	711936	711936
2	Inversión Total (2.1 + 2.2 + 2.3)	979502										
2.1	Costos Fijos Depresiables y no depresiables	765236										
2.2	Capital de trabajo	137743										
2.3	Gastos de Puesta en marcha	76524										
3	Costo Total Producto		157563	157563	157563	157563	157563	157563	157563	157563	157563	157563
4	Margen Operacional (1-3)		554373	554373	554373	554373	554373	554373	554373	554373	554373	554373
5	Depreciación		33087	33087	33087	33087	33087	33087	33087	33087	33087	33087
6	Utilidad Afecta Impuestos (4-5)		521286	521286	521286	521286	521286	521286	521286	521286	521286	521286
7	Impuestos (20% de 6)		104257	104257	104257	104257	104257	104257	104257	104257	104257	104257
8	Utilidad Neta (6-7)		417029	417029	417029	417029	417029	417029	417029	417029	417029	417029
9	Depreciación		33087	33087	33087	33087	33087	33087	33087	33087	33087	33087
												137743
10	Flujo Caja Neto (8+9)	-979502	450116	450116	450116	450116	450116	450116	450116	450116	450116	587858

Tabla 8.2 – Flujo de caja 10 años

Tabla 8.3 Flujo de caja 5 años

		Años					
		0	1	2	3	4	5
1	Ingresos por venta		711936	711936	711936	711936	711936
2	Inversión Total (2.1 + 2.2 + 2.3)	979502					
2.1	Costos Fijos Depreciables y no depreciables	765236					
2.2	Capital de trabajo	137743					
2.3	Gastos de Puesta en marcha	76524					
3	Costo Total Producto		157563	157563	157563	157563	157563
4	Margen Operacional (1-3)		554373	554373	554373	554373	554373
5	Depreciación		33087	33087	33087	33087	33087
6	Utilidad Afecta Impuestos (4-5)		521286	521286	521286	521286	521286
7	Impuestos (20% de 6)		104257	104257	104257	104257	104257
8	Utilidad Neta (6-7)		417029	417029	417029	417029	417029
9	Depreciación		33087	33087	33087	33087	33087
							137743
10	Flujo Caja Neto (8+9)	-979502	450116	450116	450116	450116	587858

Tabla 8.3 – Flujo de caja 5 años

8.3 Cálculo del Tasa Interna de Retorno (TIR)

Es la tasa que iguala el (VAN) valor presente neto a cero. La tasa interna de retorno también es conocida como la tasa de rentabilidad producto de la reinversión de los flujos netos de efectivo dentro de la operación propia del negocio y se expresa en porcentaje. También es conocida como Tasa crítica de rentabilidad cuando se compara con la tasa mínima de rendimiento requerida (tasa de descuento) para un proyecto de inversión específico.

$$VAN = FC_0 + \left(\frac{FC_1}{(1+i)^1} + \frac{FC_2}{(1+i)^2} + \dots + \frac{FC_n}{(1+i)^n} \right) = 0$$

Ec 8.2

Donde:

Flujo de Caja Anuales Actualizados = Capital Fijo

Es decir, la tasa interna de retorno es aquella tasa de interés a la cual los flujos de caja actualizados, permiten recuperar el capital en su totalidad.

Utilizando una tasa interna de retorno del 10%, el valor de VAN para un proyecto a 5 y 10 años serán:

Años	VAN	TIR
5	812319	37,7%
10	1838371	44,9%

Tabla 8.4 – Resumen VAN y TIR

9. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

En este punto se debe señalar con la mayor exactitud los aspectos más susceptibles al cambio. De esta manera, se puede predecir con mayor facilidad los gastos y/o costos de capital que las utilidades y ventas experimentan debido a las variaciones de los precios en la venta de un producto y costos en las materias primas, influenciadas por otros factores poco predecibles.

Es por esto necesaria la elaboración de graficas que muestran el efecto de las variables de costos y los precios en la rentabilidad. Para este análisis se tomaran en cuenta las siguientes graficas:

- Precio venta sulfato de zinc heptahidratado v/s VAN
- Precio venta sulfato de zinc heptahidratado v/s TIR

La variable del precio de los polvos de horno eléctrico no lo consideramos ya que, es un costo económico deshacerse de él.

En la Tabla 9.1 se muestran las variaciones del para el proyecto a 5 años

US\$/Ton							VAN	TIR
300	-979502	450116	450116	450116	450116	587858	812319	37,8
320	-979502	488086	488086	488086	488086	625828	956254	42,3
360	-979502	564026	564026	564026	564026	701768	1244126	51,2
400	-979502	639966	639966	639966	639966	777708	1531998	59,9
440	-979502	715905	715905	715905	715905	853648	1819870	68,4

Tabla 9.1 – Análisis sensibilidad 5 años

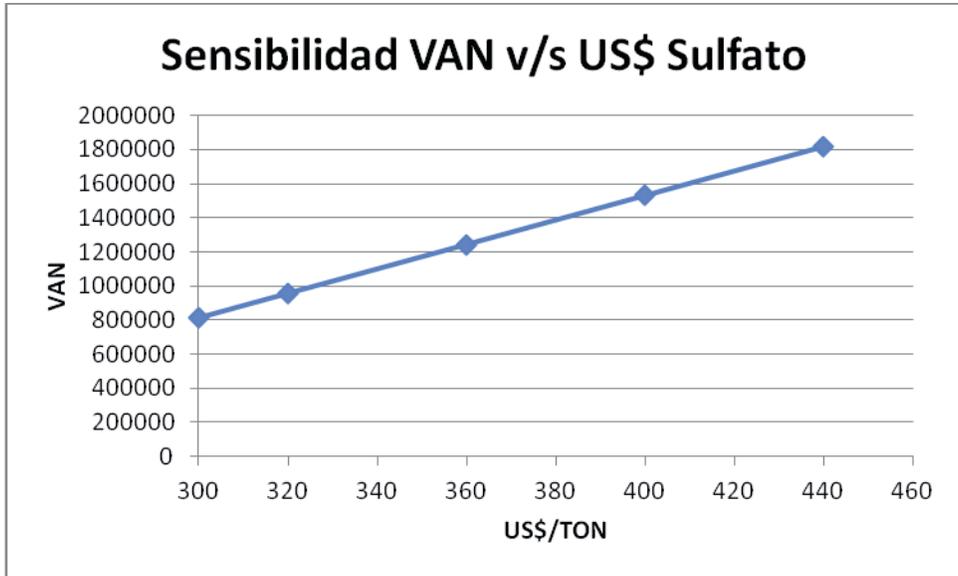


Ilustración 9.1 – Sensibilidad VAN

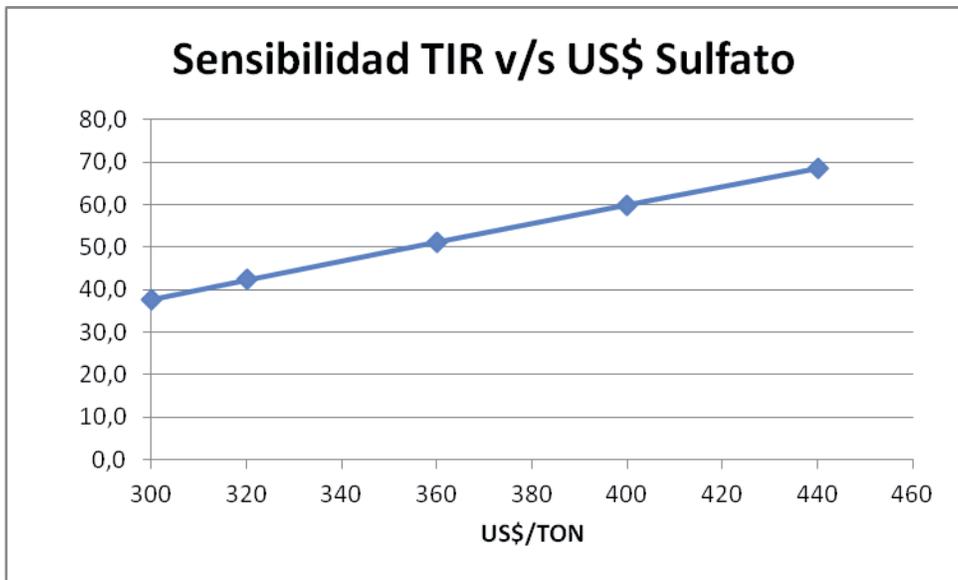


Ilustración 9.2 – Sensibilidad TIR

En la Tabla 9.2 se muestran las variaciones del para el proyecto a 10 años

US\$/Ton												VAN	TIR
300	-979502	450116	450116	450116	450116	450116	450116	450116	450116	450116	587858	1839371	45,0
320	-979502	488086	488086	488086	488086	488086	488086	488086	488086	488086	625828	2072680	49,0
360	-979502	564026	564026	564026	564026	564026	564026	564026	564026	564026	701768	2539297	57,04
400	-979502	639966	639966	639966	639966	639966	639966	639966	639966	639966	777708	3005915	65,0
440	-979502	715905	715905	715905	715905	715905	715905	715905	715905	715905	853648	3472532	72,8

Tabla 9.2 – Análisis sensibilidad 10 años

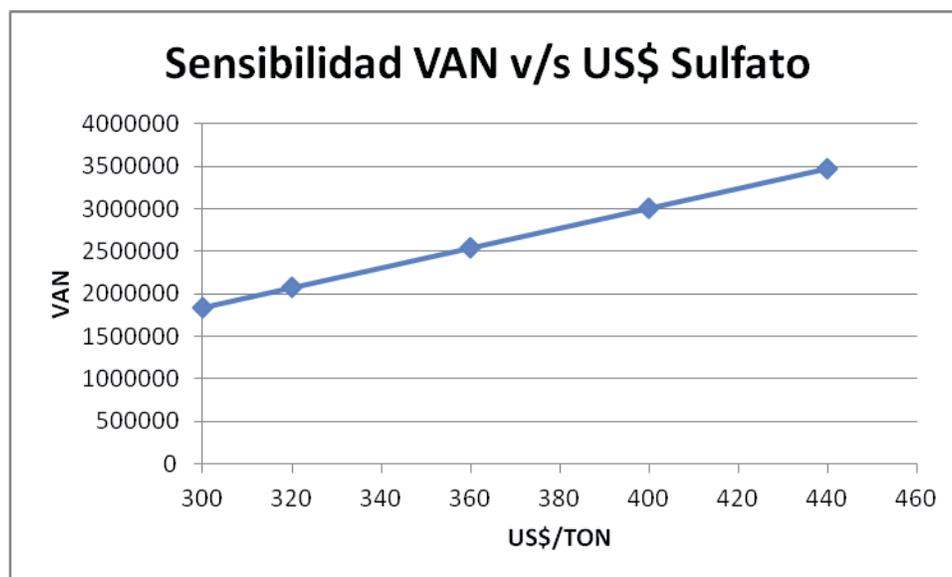


Ilustración 9.3 – sensibilidad VAN

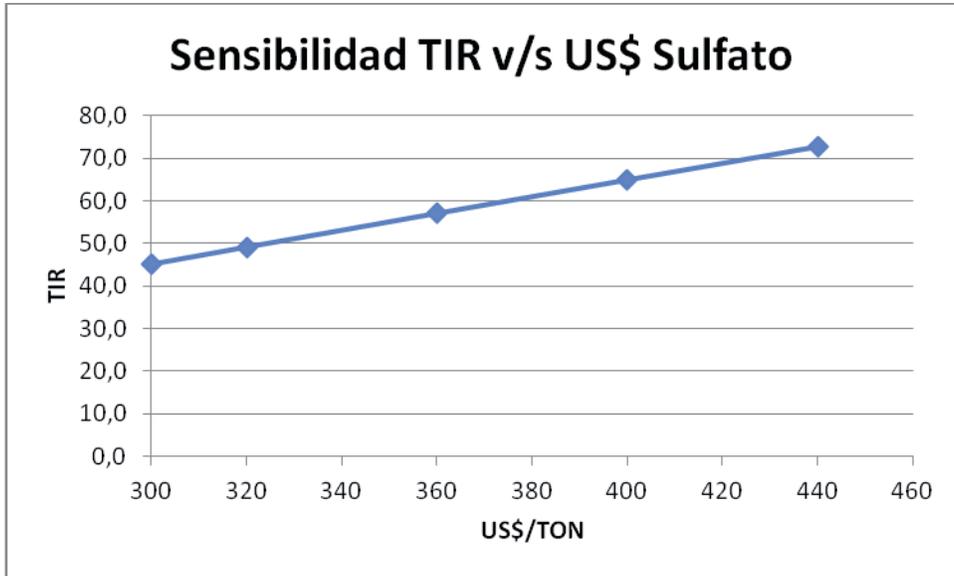


Ilustración 9.4 – Sensibilidad TIR

10. CONCLUSIONES

- Se encontró una relación entre Oxido de Zinc y Acido Sulfúrico con la cual se obtienen buenos resultados en cuanto a la recuperación de Zinc, como Sulfato Heptahidratado. Esta relación molar es 1,84 moles de Acido Sulfúrico por mol de Oxido de Zinc.
- Es factible disminuir la cantidad de mineral, catalogado como peligroso, y obtener un beneficio económico a partir de él.
- Debido a que el mineral a procesar es un desecho, podemos darle al producto un valor más bajo con respecto al que se comercializa.
- El proyecto es rentable a 5 años, entregando un TIR de 37,8%.
- La variación en el precio no afecta de gran manera la rentabilidad del proyecto, según el análisis de sensibilidad.
- Con los datos obtenidos en la experimentación y lo visualizado durante el desarrollo del tema, también puede ser una posibilidad recuperar el Zinc por electrodeposición. Esto abre una nueva opción para seguir investigado, darle otro enfoque y un mayor desarrollo.

11. BIBLIOGRAFIA

- Carolina Hernandez, Tesis: “Prefactibilidad Técnico y Económica de una Planta de Sulfato de Cobre Comercial”, PUCV, 2006.
- Peters Timmerhaus West: “Plant Design and Economics for Chemical Enginners”, Cuarta Edición, 1991.
- Perry: “Manual del Ingeniero Químico”, Séptima Edición. Editorial McGraw-Hill, 1999.
- Precios referenciales Sulfato de Zinc Heptahidratado. www.alibaba.com
- Papper sobre Zinc. “Asociación Latinoamericana de Zinc”, Latiza. www.latiza.com
- A. Marcilla Gomis: “Introducción a las operaciones de Separación”. Textos Docentes, 1998.
- Luis Vega Alarcón: “Apuntes de Ingeniería Económica”, Escuela de Ingeniería Química, 2009.
- David M. Himmelblau: “Principios Básicos y Cálculos en Ingeniería Química”, Sexta Edición. Editorial Continental, 1996.
- Smith, Van Ness, Abbott: “Introducción a la termodinámica en Ingeniería Química”, Quinta Edición. Editorial McGraw-Hill, 1999.
- Diseño de equipos e instalaciones. “deposito y recipientes de proceso”, Tema 6. 2003.
- Introducción a la Hidrometalurgia. Universidad de Atacama.
- J.P. Holman: “Transferencia de Calor”, Octava Edición (1° en español). Mc Graw-Hill, 1998.

- Carl R. Branan: “Soluciones Prácticas para el Ingeniero Químico”, Segunda Edición. Mc Graw-Hill.
- D. Kern: “Procesos de Transferencia de Calor”, Trigésima segunda reimpresión Edición. CECSA, 1999.
- Assessors’ Handbook Section 581: “EQUIPMENT AND FIXTURES INDEX, PERCENT GOOD AND VALUATION FACTORS”. January 2012.

12. ANEXO A

PRUEBAS DE LABORATORIO

La realización de estas pruebas son muy útiles para conocer tanto el comportamiento de las materias primas utilizadas, como de los compuestos que tienen menor importancia en la reacción que se realizara.

En este caso y con estos datos se espera conocer tanto la cantidad de Zn recuperado en forma de sulfato heptahidratado, como también el tiempo que tomara la reacción. Con esto es posible tomar las decisiones necesarias en cuanto a la seguridad y la eficiencia del proceso.

1.1 Lixiviación de polvo de horno eléctrico.

El ácido, al agua y el polvo son agregados al reactor para iniciar la lixiviación. Esta reacción se mantuvo a una agitación de 200 rpm, hasta que las concentraciones de Zinc no presentaran cambios en el tiempo, siendo la agitación un factor de relevancia en el proceso, ya que mejora y acelera el contacto entre el óxido y el ácido.

La literatura y la práctica, indican que la lixiviación es más eficiente si se desarrollan a presión y temperatura.

El reactor utilizado es un reactor batch que trabaja a presión atmosférica. La temperatura de trabajo se trato de mantener cerca de los 100°C, siendo esto muy difícil con las planchas calefactoras, llegando a trabajar con una temperatura de 80°C en promedio.

1.2 Composición de materia prima utilizada

El polvo de horno eléctrico utilizado tiene las cantidades de minerales que se muestran a continuación. Estos valores fueron obtenidos por Volumetría. Los principales compuestos que contiene este mineral son: ZnO, CuO.

	% Zn	% Cu
Polvos de horno	45	5,22

Zn	1,96	gr/lt
Cu	Menor a 0	gr/lt

El método de medición de las concentraciones de los minerales presentes es por volumetría, debido a la baja concentración de cobre disuelto en la solución previa a la lixiviación, fue indetectable.

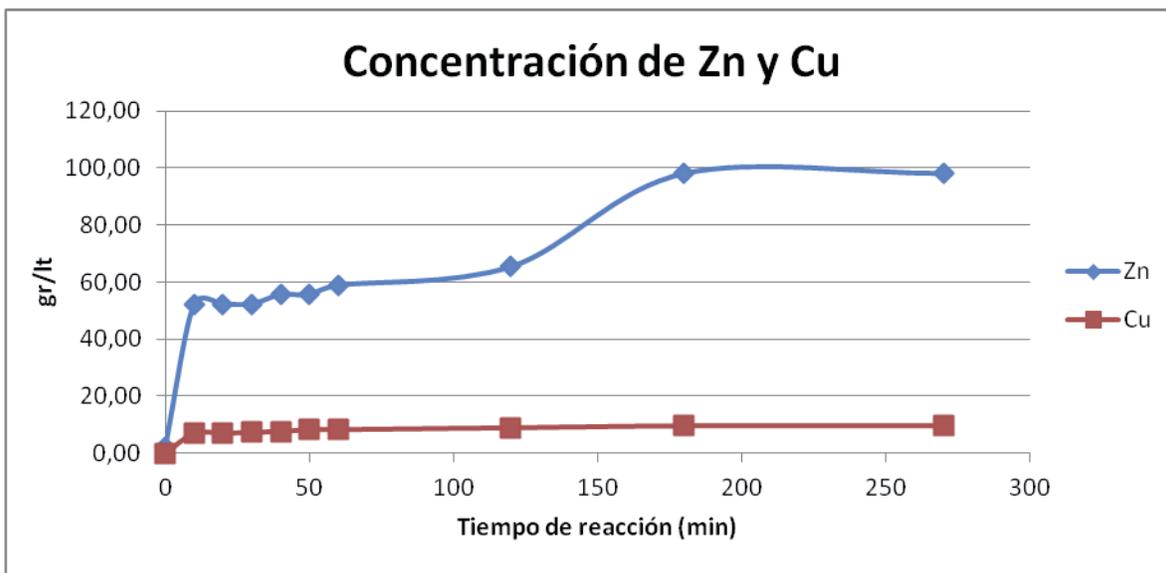
1.3 Resultados de pruebas

Después de una serie de pruebas buscando las condiciones optimas, se llega a la conclusión que a medida que se aumenta la relación entre la cantidad de polvos y agua utilizada, mejoraba el porcentaje de recuperación de Zinc y disminuye la recuperación de Cobre, como se muestra a continuación.

Los gráficos tienen por objetivo mostrar la variación de la concentración en gr/lt de Zinc y Cobre durante el tiempo reacción.

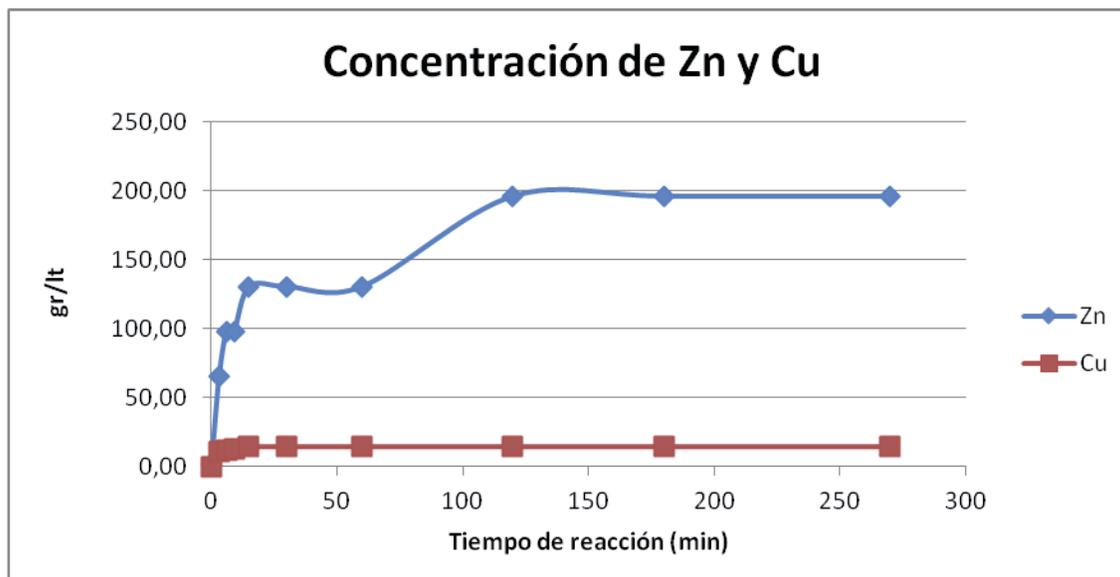
A continuación se presentan casos, en los cuales tenemos relaciones de masa polvos y agua diferentes: 224 gr/lt de polvos, 447 gr/lt de polvos y 558 gr/lt de polvos.

- Caso 1: 224 gr polvo/ lt



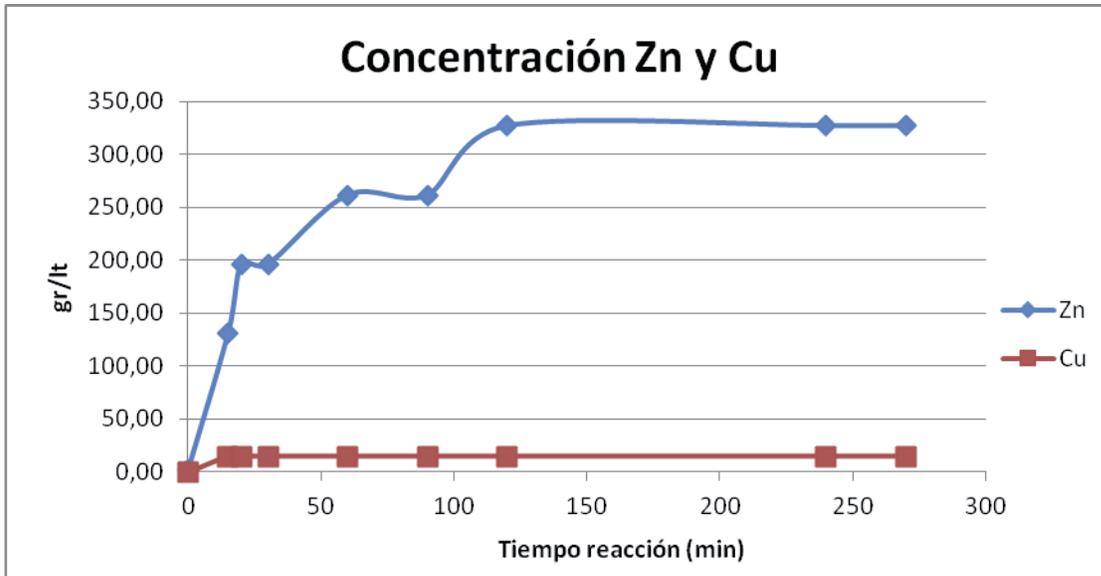
Concentración en gpl de Zn	98,10
Concentración en gpl de Cu	70,0

- Caso 2: 447 gr polvo/ lt



Concentración en gpl de Zn	196,2
Concentración en gpl de Cu	14,44

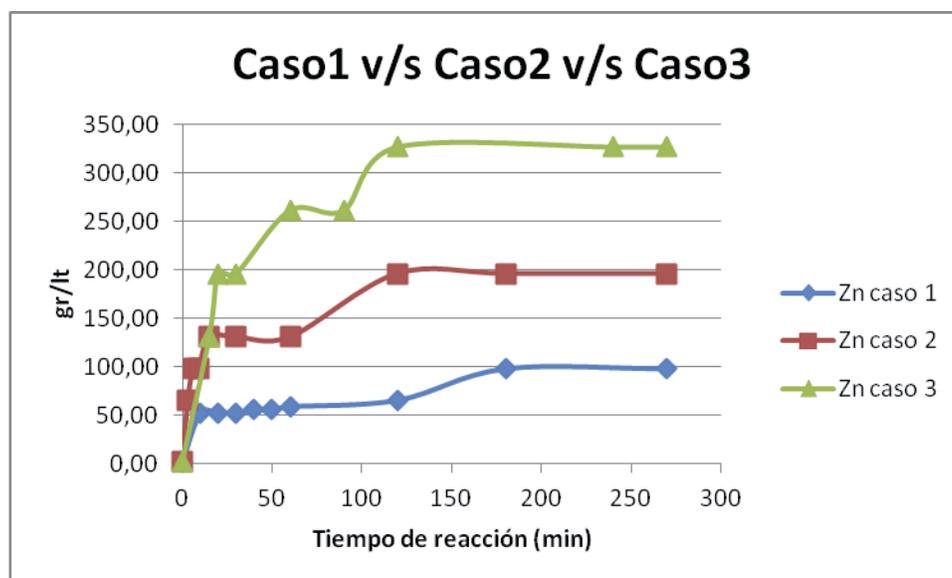
- Caso 3: 558 gr polvo/ lt



Concentración en gpl de Zn	327,0
Concentración en gpl de Cu	14,44

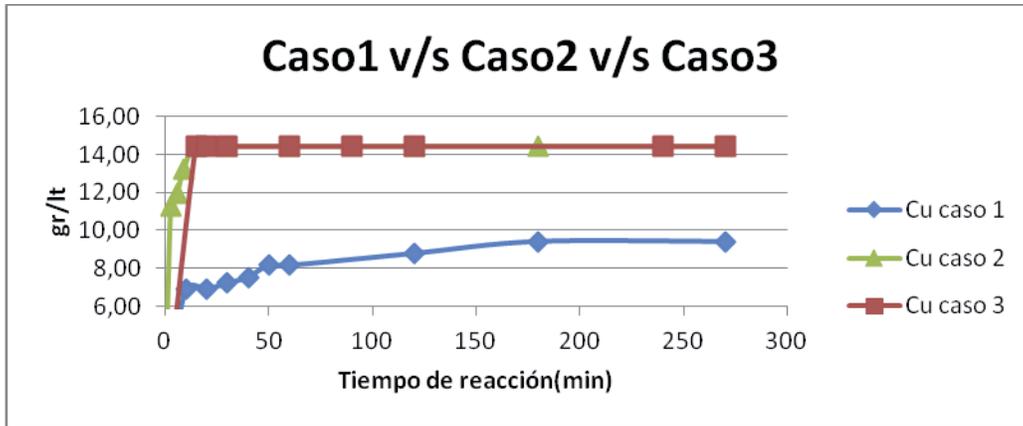
ANÁLISIS DE RESULTADOS

Comparación de los gr/lt recuperados de Zinc



gr/lt Caso 1	98,1
gr/lt Caso 2	196,2
gr/lt Caso 3	327,0

Comparación de los gr/lit recuperados de Cobre



gr/lit Caso1	9,4
gr/lit Caso2	14,4
gr/lit Caso3	14,4

Como se puede observar, a medida que aumento la relación polvos-agua y manteniendo la proporción de ácido establecida anteriormente, en el Capítulo 5, la concentración de Zinc es cada vez mayor, disminuyendo también la concentración de Cobre en la solución.

Es por esto que se tomaron las condiciones del caso 3 como las óptimas para la mayor y mejor recuperación de Zinc como Sulfato Heptahidratado.

13. ANEXO B

MEMORIA DE CÁLCULO

1. Determinación de la cantidad de mineral a tratar por batch

$$100 \frac{\text{Ton}}{\text{mes}} \cdot \frac{1\text{mes}}{30\text{días}} \cdot \frac{1000\text{Kg}}{1\text{Ton}} \cdot 1 \frac{\text{día}}{\text{batch}} = 3333,33 \frac{\text{Kg}}{\text{batch}}$$

2. Cantidad de Acido sulfúrico a utilizar

Tras una serie de pruebas exploratorias, que consistieron en probar diferentes relaciones entre la cantidad de oxido de zinc y acido sulfúrico en la lixiviación, se llego a la conclusión que la cinética con menor tiempo de reacción y mayor recuperación de Zinc, es cuando se agrega la misma cantidad en volumen de ácido (ml) que la masa de ácido (gr) calculada estequiometricamente.

La reacción corresponde a Ec. 1.2



La masa de mineral a lixiviar, a escala de laboratorio, es de 558 gr por litro de agua, donde el 45% corresponde a Oxido de Zinc ($\text{ZnO} = 81,4 \text{ gr/mol}$), por lo tanto la cantidad en gramos de Acido Sulfúrico 98% (*PERRY*: $\text{H}_2\text{SO}_4 = 98 \text{ gr/mol}$; $d = 1,84 \text{ gr/ml}$) a utilizar es:

$$558\text{gr} \cdot \frac{45}{100} \cdot \frac{1\text{mol}}{81,4\text{gr}} \cdot 98 \frac{\text{gr}}{\text{mol}} \cdot \frac{1}{0,98} = 308,4[\text{gr}]\text{H}_2\text{SO}_4$$

Y en volumen

$$V = 308,4[\text{ml}]\text{H}_2\text{SO}_4$$

3. Agua madre

En la obtención de agua madre deben cumplirse las condiciones anteriormente establecidas, en cuanto a la relación 558 [gr polvo/ lt agua] y a que el ácido alimentado debe tener un exceso de 84%, como se muestra en la Ilustración 13.1.

Esto genera una concentración inicial (antes de la reacción) de 251,1 gpl de zinc (gramos/litro agua), la cual si la relacionamos con la concentración final de zinc (a la salida del reactor) 327 gpl de zinc (gramos/litro de solución), tenemos una relación de 0,77 [Lt solución final/ Kg agua] o Lt solución final = 1,3 Kg agua

Para una alimentación de 4000 Kg de polvo, tendríamos 1800 Kg Zn^{+2} , lo que origina una cantidad de agua de 7168 Kg y 4962 Kg de ácido. Luego de la reacción, (antes de la cristalización) tenemos una concentración molar $[Zn^{+2}] = 4,98$ mol/lit.

A 20°C, el kps ($ZnSO_4$)=11,36; para conocer la cantidad a cristalizar:

$$kps = [Zn^{+2}] \cdot [SO_4^{-2}]$$

Siendo: X la cantidad a cristalizar de Zn^{+2} , 4,98 mol/lit la cantidad de SO_4^{-2} que estequiométricamente corresponde a $[Zn^{+2}]$, y 4,18 mol/lit lo que corresponde a iones SO_4^{-2} provenientes del exceso de Ácido Sulfúrico (H_2SO_4). Además, la concentración final de la solución final es $1,3 - 0,126 \cdot X$, lo que origina:

$$11,36 = \left[\frac{4,98 - x}{1,3 - 0,126 \cdot x} \right] \cdot \left[\frac{4,98 + 4,18 - x}{1,3 - 0,126 \cdot x} \right]$$

$$X = 3,5 \text{ mol}$$

Sabiendo la cantidad cristalizada, tengo la composición de agua madre, que corresponde a:

537 Kg Zn⁺², 2265 Kg H₂SO₄, y 4734 Kg agua.

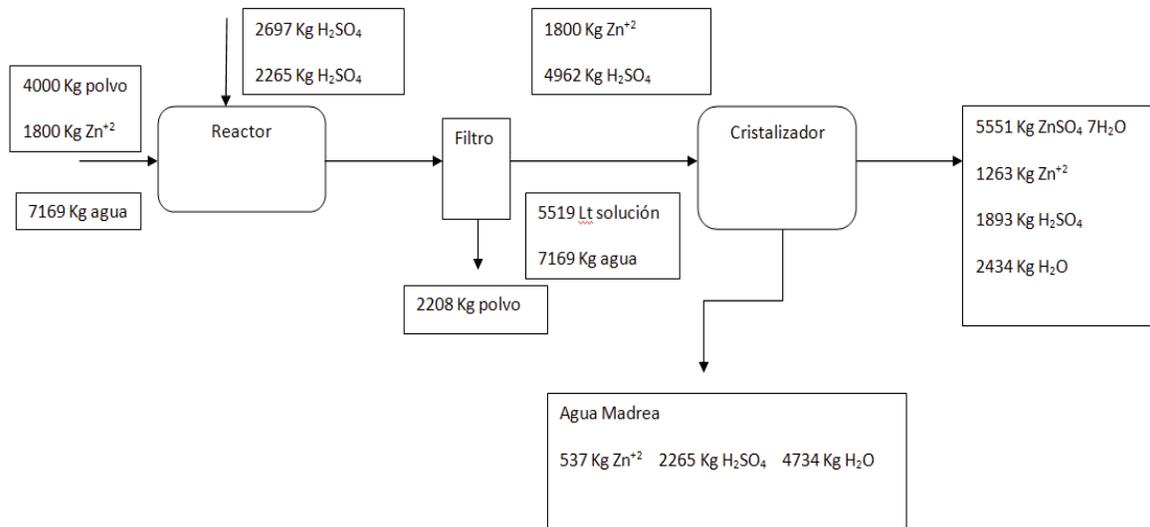


Ilustración 13.1

4. Determinación del Volumen del Reactor

Para determinar el volumen necesario, sumamos respectivamente el volumen del agua madre, agua fresca y ácido recirculante:

$$3645\text{Lt} + 2890\text{Lt} + 1231\text{Lt} = 7766\text{Lt}/\text{batch}$$

Lo aproximamos a 8 m³. Se estima un 25% de sobredimensionamiento por motivos de seguridad, con lo cual resulta un volumen final de 10 m³.

5. Diseño del Reactor

En la Tabla 13.1 se muestra la nomenclatura para el diseño

V_R	Volumen reactor	V_{CIL}	Volumen cilindro
V_{CONO}	Volumen cono	h_{CIL}	Altura cilindro
h_{CONO}	Altura cono	D_i	Diámetro interno
D_a	Diámetro agitador	L	Longitud paleta
Y	Altura paleta		

Tabla 13.1

Entonces tenemos:

$$V_R = V_{CIL} + V_{CONO}$$

$$V_{CIL} = \frac{\pi \cdot D_i^2 \cdot h_{CIL}}{4} \quad \text{y} \quad V_{CONO} = \frac{\pi \cdot D_i^2 \cdot h_{CONO}}{4 \cdot 3 \cdot 3}$$

Por lo tanto:

$$V_R = \frac{\pi \cdot D_i^2 \cdot h_{CIL}}{4} + \frac{\pi \cdot D_i^2 \cdot h_{CONO}}{4 \cdot 3 \cdot 3}$$

Donde $V_R = 10 \text{ m}^3$, además se sabe que $h_{CIL} = 3 h_{CONO}$ y $h_{CIL} = 1,5D_i$; por lo tanto queda:

$$10 = \frac{\pi \cdot D_i^2 \cdot 1,5 \cdot D_i}{4} + \frac{\pi \cdot D_i \cdot 1,5 \cdot D_i}{4 \cdot 3 \cdot 3}$$

Despejando y reemplazando, tenemos:

$$D_i = 1,97[m]$$

$$h_{CIL} = 2,96[m]$$

$$h_{CONO} = 0,98[m]$$

$$V_{CIL} = 9 \text{ m}^3 \quad \text{y} \quad V_{CONO} = 1 \text{ m}^3$$

Para el agitador tenemos que (Anexo A):

$$D_a = \frac{D_i}{3}$$

$$Y = \frac{1}{2} D_a$$

$$L = 0,3 \cdot D_i$$

Quedando finalmente:

$$D_a = 0,656 [m]$$

$$Y = 0,328 [m]$$

$$L = 0,591 [m]$$

6. Balance Energía Reactor

Para elevar la temperatura del reactor desde 25°C a 100°C, se realiza el siguiente cálculo, que se indica en el Capítulo 2.4.3:

$$Q = Ud \cdot A_t \cdot \Delta T_{LMTD}$$

- **El coeficiente de transferencia es obtenido por (Anexo C):**

$$\frac{h_i \cdot D_i}{k} = 0,36 \cdot \left(\frac{L^2 \cdot N \cdot \rho}{\mu} \right)^{2/3} \cdot \left(\frac{Cp \cdot \mu}{k} \right)^{1/3} \cdot \left(\frac{\mu}{\mu_w} \right)^{0,14}$$

Donde

r_i	3,23 pies	0,985 m
D_i	6,46 pies	1,97 m
L	1,97 pies	0,591 m
k	0,3 BTU/ h*pie*°F	0,446 Kcal/h*m*°C
ρ solución H ₂ SO ₄ 35,5%	76,13 lb/pie ³	1221 Kg/m ³
μ	2,42 lb/pie*h	3,52 Kg/m*h
Cp solución H ₂ SO ₄ 35,5%	0,723 BTU/lb*°F	0,722 Kcal/Kg*°C
N	1200 rph	200 rpm
T1 vapor a 72,5 psia	305 °F	151,7°C
T2 vapor a 72,5 psia	305 °F	151,7°C
t1	77°F	25°C
t2	212°F	100°C

Tabla 13.2

- Se calcula la concentración del ácido en la solución, por medio de la siguiente expresión. Esto para saber la real concentración de ácido en solución y así poder obtener la densidad del ácido.

$$[H_2SO_4]_{solución} = \frac{masa_Acido_98\%}{masa_agua + masa_Acido_100\%}$$

$$[H_2SO_4]_{solución} = \frac{308[ml] \cdot 1,84 \left[\frac{gr}{ml} \right] \cdot 0,98}{1000[gr] + 308[ml] \cdot 1,84 \left[\frac{gr}{ml} \right]}$$

$$[H_2SO_4]_{solución} = 35,5\%$$

Reemplazando (unidades inglesas) y despejando, obtenemos:

$$h_i = 31,183 \frac{BTU}{h \cdot pie^2 \cdot ^\circ F}$$

Por la chaqueta se utiliza vapor de agua, por lo cual tenemos

$$h_i = 1500 \frac{BTU}{h \cdot pie^2 \cdot ^\circ F} \text{ y factor de ensuciamiento } R_d = 0,001.$$

El coeficiente de transferencia de calor limpio (U_C) se obtiene de:

$$\frac{1}{U_C} = \frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_{i0}}$$

$$U_C = 30,548 \frac{BTU}{h \cdot pie^2 \cdot ^\circ F}$$

Lo que origina un coeficiente global de transferencia de calor (U_D):

$$\frac{1}{U_D} = \frac{1}{U_C} + R_d$$

$$U_D = 29,643 \frac{BTU}{h \cdot pie^2 \cdot ^\circ F}$$

• **Área de transferencia, tenemos lo siguiente:**

$$A_T = 2 \cdot \pi \cdot r_i \cdot h_{CIL} + \pi \cdot r_i \cdot \sqrt{r_i^2 + h_{CONO}^2}$$

Se usa el volumen real que utiliza la masa en el reactor, $V_R = 8 \text{ m}^3$, para poder calcular la altura real de transferencia que tendrá el reactor:

$$V_R = V_{CIL} + V_{CONO}$$

$$8 = \frac{\pi \cdot 1,97^2 \cdot h_{CIL}}{4} + 1$$

$$h_{CIL} = 2,3[m]$$

$$h_{CIL} = 7,54[pie]$$

Reemplazando, obtenemos:

$$A_T = 2 \cdot \pi \cdot 0,985 \cdot 2,3 + \pi \cdot 0,985 \cdot \sqrt{0,985^2 + 0,98^2}$$

$$A_T = 18,55[m^2]$$

$$A_T = 199,6[pie^2]$$

• Temperatura media logarítmica

$$\Delta T_{LMTD} = \frac{(T_1 - t_1) - (T_1 - t_2)}{\ln \frac{(T_1 - t_1)}{(T_1 - t_2)}}$$

$$\Delta T_{LMTD} = \frac{(305 - 77) - (305 - 212)}{\ln \frac{(305 - 77)}{(305 - 212)}}$$

$$\Delta T_{LMTD} = 150,54[^\circ F]$$

Por lo tanto el calor necesario para elevar la temperatura de 25°C a 100°C, reemplazando es:

$$Q = U_d \cdot A_t \cdot \Delta T_{LMTD}$$

$$Q = 29,643 \frac{BTU}{h \cdot pie^2 \cdot ^\circ F} \cdot 199,6[pie^2] \cdot 150,54[^\circ F]$$

$$Q = 8,9 \cdot 10^5 \frac{BTU}{h}$$

$$Q = 2,24 \cdot 10^5 \left(\frac{kcal}{hr} \right)$$

• Tiempo que tarda en alcanzar la temperatura requerida:

$$\tau = \frac{M \cdot Cp_f}{U_d \cdot A_t} \cdot Ln \left[\frac{T_1 - t_1}{T_2 - t_2} \right]$$

M corresponde a:

$$M = 3334 \frac{Kg}{batch} \cdot \frac{Lt}{0,558Kg} + 2265 \frac{Kg}{batch} + 4734Kg$$

$$M = 12974[Kg]$$

$$M = 28543[Lb]$$

Reemplazando en la Ecuación 6.8, Capitulo 6, tenemos:

$$\tau = \frac{28543 \cdot 0,723}{29,64 \cdot 199,52} \cdot Ln \left[\frac{305 - 77}{305 - 212} \right]$$

$$\tau = 3,2[h]$$

• **Masa de agua a utilizar en la elevación de la temperatura**

Del balance de energía sabemos que:

$$Q = m_{H_2O} \cdot \lambda^v$$

λ (72,5 psia) = 906,3 BTU/ lb , corresponde la entalpia de vaporización.

Por lo tanto remplazando, tenemos:

$$8,9 \cdot 10^5 \frac{BTU}{h} = m_{H_2O} \cdot 906,3 \frac{BTU}{lb}$$

$$m_{H_2O} = 982,01 \left[\frac{lb}{h} \right]$$

$$m_{H_2O} = 446,4 \left[\frac{Kg}{h} \right]$$

Determinación del flujo volumétrico de vapor saturado (F_V) que entra y líquido saturado (F_L) que sale, a una presión de 72,5 psia. (Anexo A. Fig.4)

✓ Flujo de vapor

$$F_V = m_{H_2O} \cdot v_{vs} (72,5 psia)$$

$$F_V = 982,01 \frac{lb}{h} \cdot 6,028 \frac{pie^3}{lb}$$

$$F_V = 5919,56 \left[\frac{pie^3}{h} \right]$$

$$F_V = 167,75 \left[\frac{m^3}{h} \right]$$

✓ Flujo de líquido

$$F_L = m_{H_2O} \cdot v_{Ls} (72,5 \text{ psia})$$

$$F_V = 982,01 \frac{\text{lb}}{\text{h}} \cdot 0,0175 \frac{\text{pie}^3}{\text{lb}}$$

$$F_V = 17,185 \left[\frac{\text{pie}^3}{\text{h}} \right]$$

$$F_V = 0,487 \left[\frac{\text{m}^3}{\text{h}} \right]$$

7. Curvas de Solubilidad

Como sabemos:

$$K_{ps} \text{ ZnSO}_4 (\text{°C}) = [\text{Zn}^{+2}][\text{SO}_4^{-2}]$$

La solubilidad de zinc es $s = \sqrt{K_{ps}}$

Si “x” es la concentración de zinc a cristalizar, y “e” la concentración en exceso de ácido, “acides libre”.

La expresión nos queda:

$$K_{ps} \text{ ZnSO}_4 (\text{°C}) = [s-x][s+e-x]$$

Sea:

$$Y = s-x$$

$$x = s-Y$$

Reemplazando tenemos:

$$Y(e-Y) = K_{ps} (\text{°C})$$

Obteniendo las Tablas 13.3 y 13.4, que dan origen a las curvas de solubilidad del $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, que se muestra en la Ilustración 13.2.

T° = 10°C												
Solubilidad Zn (Y)	mol/lt	2,91	2,45	2,08	1,77	1,53	1,34	1,18	1,05	0,95	0,86	0,78
	gr/lt	190,31	160,23	136,03	115,76	100,06	87,64	77,17	68,67	62,13	56,24	51,01
lo q ppta (x)	mol /lt	0,00	0,46	0,83	1,14	1,38	1,57	1,73	1,86	1,96	2,05	2,13
	gr/lt	0,00	30,08	54,28	74,56	90,25	102,68	113,14	121,64	128,18	134,07	139,30

Tabla 13.3

T° = 20°C												
Solubilidad Zn (Y)	mol/lt	3,37	2,91	2,52	2,19	1,92	1,67	1,51	1,36	1,23	1,12	1,03
	gr/lt	220,40	190,31	164,81	143,23	125,57	109,22	98,75	88,94	80,44	73,25	67,36
lo q ppta (x)	mol /lt	0,00	0,46	0,85	1,18	1,45	1,70	1,86	2,01	2,14	2,25	2,34
	gr/lt	0,00	30,08	55,59	77,17	94,83	111,18	121,64	131,45	139,96	147,15	153,04

Tabla 13.4

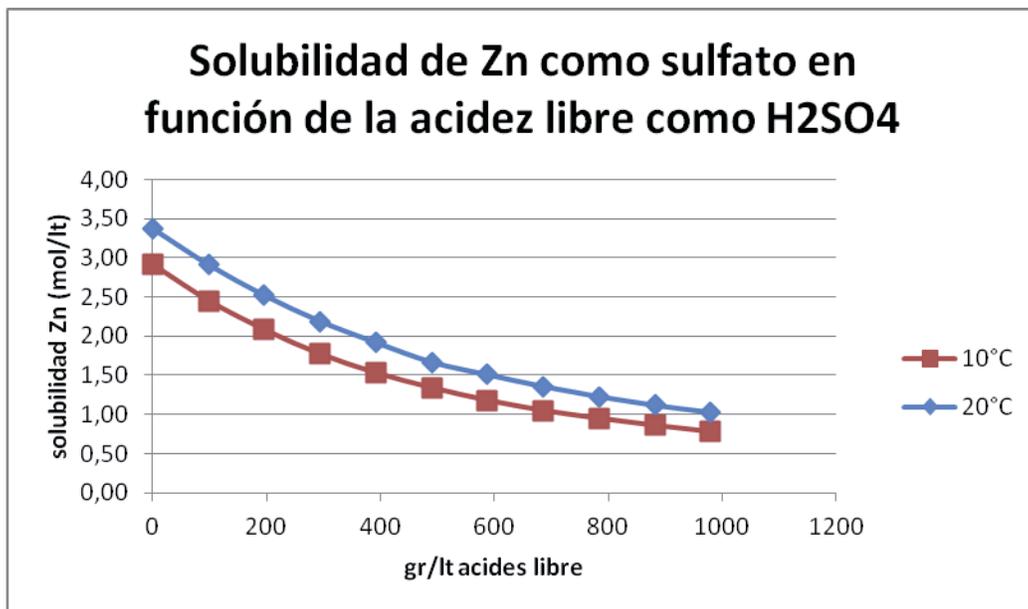


Ilustración 13.2

8. Costos de Equipos principales

El valor de los equipos principales obtenidos desde la fuente “*www.matche.com*”, son valores del año 2007, como se indico en el Capitulo 7, por lo que es necesario llevar ese precio a un valore presente (2011). Para esto utilizamos el método de corrección de los índices de costos de equipos (Anexo C. Fig.6)

$$Costo2 = Costo1 \cdot \frac{Indice2}{Indice1}$$

Donde:

Costo 2= costo equipo en el presente

Costo 1= costo equipo en el pasado

Índice 2= costo indexado en el presente

Índice 1= costo indexado en el pasado

✓ Reactor

Costo 1 = US\$ 85000

Índice 1 = 110

Índice 2 = 100

Costo 2 = US\$ 93500

✓ Filtro

Costo 1 = US\$ 27900

Índice 1 = 110

Índice 2 = 100

Costo 2 = US\$ 30690

✓ Cristalizador

Costo 1 = US\$ 125100

Índice 1 = 110

Índice 2 = 100

Costo 2 = US\$ 137610

✓ Centrifuga

Costo 1 = US\$ 51700

Índice 1 = 110

Índice 2 = 100

Costo 2 = US\$ 56870

El precio total de los equipos es US\$ 318670, que corresponde al valor FOB.

Para poder obtener el valor real de los equipos principales, y así calcular el capital de inversión, necesitamos el valor CIF.

$CIF = FOB + \text{seguros} + \text{transporte}$

Para la importación de minerales u otros objetos se puede hacer una relación entre CIF y FOB.

$$CIF = \frac{FOB}{0,8}$$

Los valores de los seguros y transporte, fueron obtenidos desde una Empresa “Maestranza Wilde”, para así tener un valor referencial más real. Con estos datos obtenemos un valor de los equipos principales de:

$$CIF = 3018670 + 12200$$

$$CIF = \text{US\$ } 318670$$

14. ANEXO C

APLICACIONES ADICIONALES

Introducción. Hay cierto número de usos colaterales para el equipo de transferencia de calor que no han aparecido en ninguno de los capítulos anteriores. Algunos de éstos incluyen las formas comunes y menos caras de superficies de transferencia de calor, tales como serpentines, tuberías sumergidas en cajas, y enfriadores tipo trombón. La mayoría de los elementos de transferencia térmica tratados aquí no están muy relacionados con aquellos que se discutieron en capítulos anteriores, ni su comportamiento puede calcularse con igual exactitud. Esta es una limitación importante cuando se trata de calcular los requerimientos de superficie para lograr una temperatura precisa. Aquí, en este capítulo, se tratan los siguientes elementos :

1. Recipientes enchaquetados
2. Serpentes
3. Serpentin sumergido
4. Enfriador tipo trombón
5. Enfriador atmosférico
6. Condensador evaporativo
7. Bayoneta
8. Intercambiador de película descendente
9. Materiales granulares en tubos
10. Calentadores con resistencia eléctrica

1. RECIPIENTES ENCHAQUETADOS

Recipientes sin agitación. En la literatura se dispone de pocos datos para predecir los coeficientes dentro de una chaqueta o entre la chaqueta y un líquido contenido en un recipiente cilíndrico vertical en el que no se cuenta con agitación mecánica. Durante el calentamiento, el fenómeno de mezcla depende de la convección libre, la que no ha sido correlacionada más que en el Cap. 10. Los coeficientes para calentamiento en convección libre pueden aproximarse para recipientes de gran diámetro mediante las Ecs. (10.8) a (10.11).

No se dispone de datos consistentes para el enfriamiento por convección libre, aun cuando los coeficientes indudablemente serán menores.

Colburn¹ ha tabulado los resultados de cierto número de estudios de lo cual se pueden sacar algunas amplias generalizaciones. Para la transferencia de calor de vapor de agua condensada en una chaqueta a agua hirviendo dentro del recipiente, el coeficiente total limpio es de cerca de 250 Btu/(h)(pie²)(°F) para recipientes de cobre y 175 para recipientes de acero. La diferencia se debe a las conductividades y espesor estructural equivalente de los dos metales, respectivamente. Los mismos coeficientes pueden también esperarse para la ebullición de soluciones acuosas diluidas. Para el calentamiento o enfriamiento de agua a agua, un coeficiente total de 100 Btu/(h)(pie²)(°F) parece ser razonable siempre y cuando ninguna de las corrientes se refrigere. Para soluciones acuosas cuyas propiedades no difieran grandemente de aquellas del agua pura, los coeficientes tal vez sean entre 75 y 80. Para el calentamiento o enfriamiento de hidrocarburos no viscosos, el coeficiente total deberá reducirse a cerca de 50. Para aquellos fluidos clasificados como compuestos orgánicos medios en la Tabla 8, el rango más probable de los coeficientes es de 10 a 20. La chaqueta de un recipiente puede tener defectores helicoidales para asegurar una circulación positiva.

Un coeficiente de transferencia de calor seleccionado de los grupos anteriores no puede incorporarse a la ecuación de Fourier $Q = UA \Delta T$ excepto cuando el recipiente opere a régimen constante. Un recipiente enchaquetado puede adaptarse para operaciones de régimen constante cuando la entrada y salida de materiales sea constante. Ya que los recipientes enchaquetados son fundamentalmente aparatos para procesar lotes, la diferencia de temperatura durante el proceso de calentamiento o enfriamiento no es constante. El coeficiente debe, por lo tanto, sustituirse en una ecuación de estado *inestable* apropiada, tales como las Ecs. (18.5), (18.7), (18.9) o (18.11), que toman en consideración el tiempo requerido para cambiar la temperatura del lote y emplean una diferencia de temperatura que varía con el tiempo.

Recipientes con agitación mecánica. Chilton, Drew y Jebens,² han publicado una excelente correlación tanta para recipientes enchaquetados como para serpentines, ya sea para proceso de lotes o en condiciones de régimen constante empleando el factor j de Sieder-Tate para transferencia de calor y un número de Reynolds modifi-

¹ Perry, J. H., "Chemical Engineers' Handbook", 3d ed., Págs. 481-482, McGraw-Hill Book Company, Inc. New York, 1960.

² Chilton, T. H., T. E. Drew, and R. H. Jebens, *Ind. Eng. Chem.*, 36, 510-516 (1944).

cado para agitación mecánica. Emplearon un agitador plano. Aunque la mayoría del trabajo se efectuó en recipientes de un pie de diámetro, se obtuvieron comprobaciones en recipientes cuyo tamaño era cinco veces el usado experimentalmente. Las desviaciones en las corridas efectuadas con agua fueron las más altas de todos los fluidos que se probaron, que incluyeron aceites lubricantes y glicerina, y que en algunos casos se desviaron 17.5%. Mack y Uhl³ han presentado y discutido aplicaciones adicionales de este método, así como su cálculo. Para recipientes enchaquetados se encontró que la correlación mantiene su validez hasta el punto en que la velocidad del agitador es tal que introduce aire en el líquido. Para el agua, este punto corresponde a una velocidad del agitador de 200 rpm, y para otros líquidos la velocidad fue mayor. En la Fig. 20.1 se muestra un recipiente enchaquetado estándar. Consiste de un recipiente y su chaqueta y los medios apropiados para circular el líquido dentro de la chaqueta y un agitador de aspas planas.

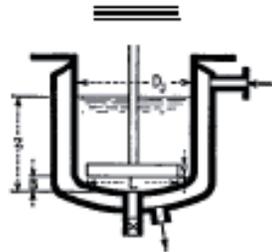


FIG. 20.1. Recipiente enchaquetado

Las dimensiones esenciales para el cálculo son, altura de la porción húmeda del recipiente z , diámetro del recipiente D_i , longitud de la paleta del agitador L , y la altura desde el fondo de la paleta hasta el fondo del recipiente B . Los estudios hechos por White y colaboradores⁴ indican que los requerimientos de potencia pueden determinarse como una función del número de Reynolds modificado, $Re_i = L^2 N \rho / \mu$, donde L es la longitud en pies de la paleta, N el número de revoluciones por hora, ρ de la densidad promedio, y μ la viscosidad del líquido. Chilton, Drew, y Jebens han empleado el mismo número de Reynolds para la transferencia de calor. Sus resultados están dados por la siguiente ecuación consistente

$$\frac{h_i D_i}{k} = 0.36 \left(\frac{L^2 N \rho}{\mu} \right)^{0.75} \left(\frac{c \mu}{k} \right)^{0.14} \left(\frac{\mu}{\mu_w} \right)^{0.14} \quad (20.1)$$

³ Mack, D. E. and V. W. Uhl, *Chem. Eng.* 54, No. 9, 119.125; No. 10, 116.116 (1947).

⁴ White, A. M., E. Brenner, G. A. Phillips, and M. S. Morrison, *Trans. AIChE*, 30, 535 (1934).

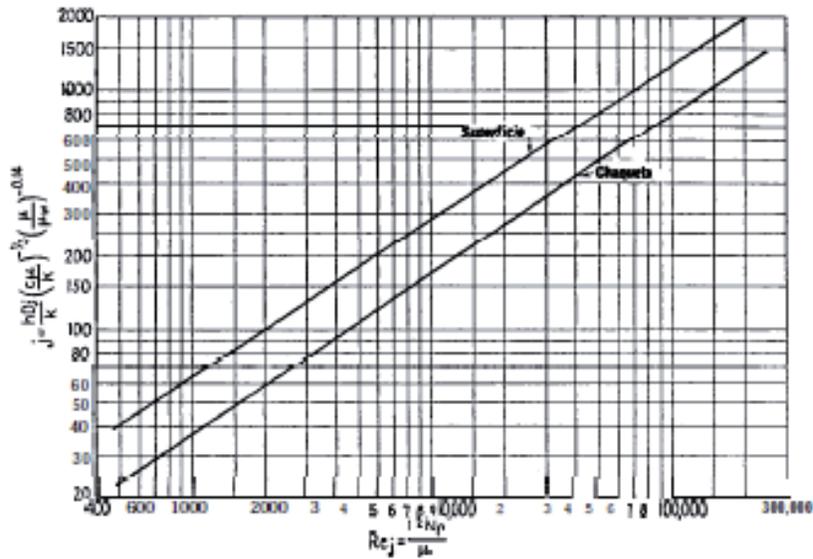


FIG. 20.2. Coeficientes de transferencia de calor para chaquetas y serpentines. (Chilton, Drew, and Jebens *Industrial and Engineering Chemistry*)

La Ec. (20.1) se grafica como la línea inferior de la Fig. 20.2. Se ve que en el cambio de planta piloto a tamaño industrial, el cambio de coeficiente está dado por

$$\frac{h_{j1}}{h_{j2}} = \left(\frac{L_1}{L_2} \right)^{1/3} \left(\frac{N_1}{N_2} \right) \quad (20.2)$$

Las demandas de potencia están dadas por la ecuación dimensional de White y colaboradores.

$$hp = 1.29 \times 10^{-4} D^3 L^{3.75} N^{3.88} \mu^{0.32} \rho^{0.14} \nu^{0.38} \quad (20.3)$$

donde y = ancho del agitador, pies

N^r = velocidad, rps

μ^r = viscosidad, lb/pie x seg

Estas ecuaciones son válidas para agitadores de aspas localizados centralmente con $L > 0.3D$, y con una altura $< L/6$. El coeficiente en la chaqueta propiamente dicha no se ha determinado, aun cuando se puede estimar con facilidad ya sea para el agua y vapor de agua. El uso de este método en la solución de un problema típico se da en seguida.

EJEMPLO 20.1. Cálculo de un recipiente enchaquetado. Un recipiente con chaqueta tiene las siguientes dimensiones: Una tubería de 12 pig IPS está en-

TABLA 4. CONDUCTIVIDADES TERMICAS DE LIQUIDOS *

$$k = \frac{1}{(h)(pic^2)} \left(\frac{F}{pie} \right)$$

Puede suponerse una variación lineal con la temperatura. Los valores extremos que se dan constituyen también los límites de temperatura en los cuales se recomiendan los datos.

Líquido	°F	k	Líquido	°F	k
Acetato de amilo	86	0.104	Bromobenceno	86	0.074
Ricino	211	0.100	Metilato de sodio	212	0.070
Oliva	88	0.097		86	0.100
Acetato de etilo	86	0.095	Sulfuro de carbono	86	0.111
Alcohol 100%	86	0.101		86	0.092
80%	86	0.105	Tetracloruro	107	0.088
60%	86	0.137		32	0.107
40%	86	0.178	Cloruro de calcio, salmuera 30%	154	0.094
20%	86	0.234		86	0.32
100%	86	0.281	Cloruro de sodio, salmuera 15%	86	0.34
Esencia	122	0.067	Cloruro de sodio, salmuera 25.0%	86	0.33
Bromuro	86	0.060		86	0.34
Eter	140	0.070	Clorobenceno	86	0.083
Yoduro	167	0.078	Clorofoma	86	0.084
Acetato de amilo	104	0.064	Cumeno (para)	86	0.078
Alcohol (n-)	167	0.063	Esencia (n-)	86	0.085
	86	0.083		140	0.083
	86	0.094	Diclorodifluorometano	86	0.067
	212	0.089		86	0.051
	86	0.080		100	0.048
Acetato butílico (n-)	77-86	0.087		140	0.043
Alcohol (n-)	86	0.085	Dicloroetano	180	0.038
(iso-)	157	0.097	Diclorometano	122	0.082
	86	0.091		86	0.111
Acetona	86	0.102	Eter de petróleo	86	0.096
Acido acético 100%	167	0.068		86	0.070
80%	86	0.089	Etilen glicol	167	0.073
60%	86	0.30		32	0.153
Acido esteárico	212	0.0700	Clasolina	86	0.072
Acido láurico	86	0.102	Glicerina 100%	86	0.184
Acido nítrico	86	0.0928	80%	86	0.169
Acido palmítico	212	0.0835	60%	86	0.320
Acido sulfúrico 80%	86	0.21	40%	86	0.359
80%	86	0.25	20%	86	0.378
30%	86	0.30	100%	212	0.164
Agua	32	0.330	Heptano (n-)	86	0.081
	86	0.356		140	0.079
	140	0.381	Hexano (n-)	86	0.080
	176	0.398		140	0.078
Alcohol amílico	77-86	0.104	Kerosena	86	0.086
Alcohol heptílico (n-)	86	0.094		167	0.081
	86	0.091	Mercurio	82	0.93
Alcohol hexílico (n-)	187	0.093	Nitrobenceno	86	0.085
	187	0.089		212	0.088
Alcohol metílico 100%	86	0.124	Nitrometano	86	0.125
80%	86	0.154		140	0.120
60%	86	0.180	Nonylo (n-)	86	0.084
40%	86	0.234		140	0.082
20%	86	0.284	Octano (n-)	86	0.083
100%	122	0.114		140	0.081
Cloruro	86	0.111	Formaldehído	86	0.094
	86	0.085		212	0.078
Alcohol propílico (n-)	86	0.089	Pentano (n-)	86	0.078
Alcohol (iso-)	187	0.082		167	0.074
	86	0.091	Percloroetileno	122	0.082
	140	0.093	Sodio	212	49
Amoníaco	8-86	0.29	Tolueno	410	46
Amoníaco, acuoso, 26%	86	0.091		86	0.086
	140	0.09	1,1-dicloroetano	167	0.084
Anilina	32-86	0.100	Tricloroetano	122	0.077
Esencia	86	0.092	Tricloroetileno	122	0.080
	140	0.087	Parafina (saturada)	39	0.074
			Vaselina	86	0.106
			Xileno (orto-)	86	0.090
			Xileno (meta-)	86	0.090

* D. E. Perry, J. H., "Chemical Engineers' Handbook", 3^a ed., McGraw-Hill Book Company Inc., New York, 1950.

Ilustración 14.1

TABLE 2-101 Sulfuric Acid (H₂SO₄)

%	0°C	10°C	15°C	20°C	25°C	30°C	40°C	50°C	60°C	80°C	100°C
1	1.0074	1.0068	1.0060	1.0051	1.0038	1.0022	0.9996	0.9944	0.9896	0.9779	0.9648
2	1.0147	1.0138	1.0129	1.0118	1.0104	1.0087	1.0060	1.0006	0.9956	0.9830	0.9708
3	1.0219	1.0206	1.0197	1.0184	1.0169	1.0152	1.0113	1.0067	1.0017	0.9900	0.9786
4	1.0291	1.0275	1.0264	1.0250	1.0234	1.0216	1.0176	1.0129	1.0078	0.9961	0.9827
5	1.0364	1.0344	1.0332	1.0317	1.0300	1.0281	1.0240	1.0192	1.0140	1.0022	0.9888
6	1.0437	1.0414	1.0400	1.0388	1.0367	1.0347	1.0306	1.0256	1.0203	1.0084	0.9950
7	1.0511	1.0485	1.0469	1.0453	1.0434	1.0414	1.0371	1.0321	1.0266	1.0146	1.0013
8	1.0585	1.0556	1.0539	1.0522	1.0502	1.0481	1.0437	1.0386	1.0330	1.0209	1.0076
9	1.0660	1.0628	1.0610	1.0591	1.0571	1.0549	1.0503	1.0451	1.0398	1.0273	1.0140
10	1.0735	1.0700	1.0681	1.0661	1.0640	1.0617	1.0570	1.0517	1.0460	1.0338	1.0204
11	1.0810	1.0773	1.0753	1.0731	1.0710	1.0686	1.0637	1.0584	1.0526	1.0403	1.0269
12	1.0886	1.0846	1.0825	1.0802	1.0780	1.0756	1.0706	1.0651	1.0593	1.0469	1.0335
13	1.0962	1.0920	1.0898	1.0874	1.0851	1.0826	1.0774	1.0719	1.0661	1.0536	1.0402
14	1.1039	1.0994	1.0971	1.0947	1.0922	1.0897	1.0844	1.0788	1.0729	1.0603	1.0469
15	1.1116	1.1069	1.1045	1.1020	1.0994	1.0968	1.0914	1.0857	1.0798	1.0671	1.0537
16	1.1194	1.1145	1.1120	1.1094	1.1067	1.1040	1.0986	1.0927	1.0868	1.0740	1.0606
17	1.1272	1.1221	1.1196	1.1168	1.1141	1.1113	1.1057	1.0998	1.0938	1.0809	1.0674
18	1.1351	1.1298	1.1271	1.1243	1.1215	1.1187	1.1129	1.1070	1.1009	1.0879	1.0744
19	1.1430	1.1375	1.1347	1.1318	1.1290	1.1261	1.1202	1.1142	1.1081	1.0950	1.0814
20	1.1510	1.1453	1.1424	1.1394	1.1365	1.1335	1.1275	1.1215	1.1153	1.1021	1.0885
21	1.1590	1.1531	1.1501	1.1471	1.1441	1.1410	1.1349	1.1288	1.1226	1.1093	1.0957
22	1.1670	1.1609	1.1579	1.1548	1.1517	1.1486	1.1424	1.1362	1.1299	1.1166	1.1029
23	1.1751	1.1688	1.1657	1.1626	1.1594	1.1563	1.1500	1.1437	1.1373	1.1239	1.1102
24	1.1832	1.1768	1.1736	1.1704	1.1672	1.1640	1.1576	1.1512	1.1448	1.1313	1.1176
25	1.1914	1.1848	1.1816	1.1783	1.1750	1.1718	1.1653	1.1588	1.1523	1.1388	1.1250
26	1.1996	1.1929	1.1896	1.1862	1.1829	1.1796	1.1730	1.1665	1.1599	1.1463	1.1325
27	1.2078	1.2010	1.1976	1.1942	1.1909	1.1875	1.1808	1.1742	1.1676	1.1539	1.1400
28	1.2160	1.2091	1.2057	1.2023	1.1989	1.1955	1.1887	1.1820	1.1753	1.1616	1.1476
29	1.2243	1.2173	1.2138	1.2104	1.2069	1.2035	1.1966	1.1898	1.1831	1.1693	1.1553
30	1.2326	1.2255	1.2220	1.2185	1.2150	1.2115	1.2046	1.1977	1.1909	1.1771	1.1630
31	1.2409	1.2338	1.2302	1.2267	1.2232	1.2196	1.2126	1.2057	1.1988	1.1849	1.1708
32	1.2493	1.2421	1.2385	1.2349	1.2314	1.2278	1.2207	1.2137	1.2068	1.1928	1.1787
33	1.2577	1.2504	1.2468	1.2432	1.2396	1.2360	1.2289	1.2218	1.2148	1.2008	1.1866
34	1.2661	1.2588	1.2552	1.2515	1.2479	1.2443	1.2371	1.2300	1.2229	1.2088	1.1946
35	1.2746	1.2672	1.2636	1.2599	1.2563	1.2526	1.2454	1.2383	1.2311	1.2169	1.2027
36	1.2831	1.2757	1.2720	1.2684	1.2647	1.2610	1.2538	1.2466	1.2394	1.2251	1.2109
37	1.2917	1.2843	1.2806	1.2769	1.2732	1.2695	1.2622	1.2550	1.2477	1.2334	1.2192
38	1.3004	1.2929	1.2891	1.2854	1.2817	1.2780	1.2707	1.2635	1.2561	1.2418	1.2276
39	1.3091	1.3016	1.2978	1.2941	1.2904	1.2866	1.2793	1.2720	1.2646	1.2503	1.2361
40	1.3179	1.3103	1.3065	1.3028	1.2991	1.2953	1.2880	1.2806	1.2732	1.2589	1.2446
41	1.3268	1.3191	1.3153	1.3116	1.3079	1.3041	1.2967	1.2893	1.2819	1.2675	1.2532
42	1.3357	1.3280	1.3242	1.3205	1.3167	1.3129	1.3055	1.2981	1.2907	1.2762	1.2619
43	1.3447	1.3370	1.3332	1.3294	1.3256	1.3218	1.3144	1.3070	1.2996	1.2850	1.2707
44	1.3538	1.3461	1.3423	1.3384	1.3346	1.3308	1.3234	1.3160	1.3086	1.2939	1.2796
45	1.3630	1.3553	1.3515	1.3476	1.3437	1.3399	1.3325	1.3251	1.3177	1.3029	1.2886
46	1.3724	1.3646	1.3608	1.3569	1.3530	1.3492	1.3417	1.3343	1.3269	1.3120	1.2976
47	1.3819	1.3740	1.3702	1.3663	1.3624	1.3586	1.3510	1.3435	1.3361	1.3211	1.3067
48	1.3915	1.3836	1.3797	1.3758	1.3719	1.3680	1.3604	1.3528	1.3453	1.3303	1.3159
49	1.4012	1.3933	1.3893	1.3854	1.3814	1.3775	1.3699	1.3623	1.3548	1.3397	1.3253
50	1.4110	1.4031	1.3990	1.3951	1.3911	1.3872	1.3796	1.3719	1.3644	1.3493	1.3348
51	1.4209	1.4128	1.4088	1.4049	1.4009	1.3970	1.3893	1.3816	1.3740	1.3589	1.3444
52	1.4310	1.4228	1.4188	1.4148	1.4109	1.4069	1.3991	1.3914	1.3837	1.3687	1.3540
53	1.4412	1.4329	1.4289	1.4248	1.4209	1.4169	1.4091	1.4013	1.3936	1.3785	1.3637
54	1.4515	1.4431	1.4391	1.4350	1.4310	1.4270	1.4191	1.4113	1.4036	1.3884	1.3738
55	1.4619	1.4535	1.4494	1.4453	1.4412	1.4372	1.4293	1.4214	1.4137	1.3984	1.3834
56	1.4724	1.4640	1.4598	1.4557	1.4516	1.4475	1.4396	1.4317	1.4239	1.4086	1.3934
57	1.4830	1.4746	1.4703	1.4662	1.4621	1.4580	1.4500	1.4420	1.4342	1.4187	1.4035
58	1.4937	1.4852	1.4809	1.4768	1.4726	1.4685	1.4604	1.4524	1.4446	1.4290	1.4137
59	1.5045	1.4960	1.4916	1.4875	1.4832	1.4791	1.4709	1.4629	1.4551	1.4393	1.4240
60	1.5154	1.5067	1.5024	1.4983	1.4940	1.4898	1.4816	1.4736	1.4656	1.4497	1.4344
61	1.5264	1.5177	1.5133	1.5091	1.5048	1.5006	1.4923	1.4842	1.4762	1.4602	1.4449
62	1.5375	1.5287	1.5243	1.5200	1.5157	1.5115	1.5031	1.4950	1.4869	1.4708	1.4554
63	1.5487	1.5398	1.5354	1.5310	1.5267	1.5225	1.5140	1.5059	1.4977	1.4815	1.4660
64	1.5600	1.5510	1.5465	1.5421	1.5378	1.5335	1.5250	1.5167	1.5085	1.4923	1.4766

Ilustración 14.2

TABLE 2-120 Solubilities of Inorganic Compounds in Water at Various Temperatures (Concluded)

	Substance	Formula	Solid phase	0°C	10°C	20°C	30°C	40°C	50°C	60°C	70°C	80°C	90°C	100°C	
1	Sodium vanadate (meta)	NaVO ₃				21.10 ^{25o}		26.23		32.97	36.9	38.8 ^{25o}			1
2	Stannous chloride	SnCl ₂		83.9		269.8 ^{15o}									2
3	sulfate	SnSO ₄				19								18	3
4	Strontium acetate	Sr(C ₂ H ₃ O ₂) ₂	4H ₂ O	36.9	43.61										4
5	acetate	Sr(C ₂ H ₃ O ₂) ₂	½H ₂ O		42.95	41.6	39.5		37.35		36.24	36.10		36.4	5
6	chloride	SrCl ₂	6H ₂ O	43.5	47.7	52.9	58.7	65.3	72.4	81.8					6
7	chloride	SrCl ₂	2H ₂ O								85.9	90.5		100.8	7
8	nitrate	Sr(NO ₃) ₂	1H ₂ O	52.7		64.0			83.8	97.2			130.4	139	8
9	nitrate	Sr(NO ₃) ₂	4H ₂ O	40.1		70.5									9
10	nitrate	Sr(NO ₃) ₂					88.6	90.1		93.8	96	98	100		10
11	sulfate	SrSO ₄		0.0113		0.0114	0.0114								11
12	Sulfur dioxide, 760 mm †	SO ₂		22.83	16.21	11.29	7.81	5.41	4.5						12
13	Thallium sulfate	Tl ₂ SO ₄		2.70	3.70	4.87	6.16		9.21	10.92	12.74	14.61	16.53	18.45	13
14	Thorium sulfate	Th(SO ₄) ₂	9H ₂ O	0.74	0.98	1.38	1.995	2.998							14
15	sulfate	Th(SO ₄) ₂	8H ₂ O	1.0	1.25	1.62									15
16	sulfate	Th(SO ₄) ₂	6H ₂ O	1.50		1.90	2.45			6.64					16
17	sulfate	Th(SO ₄) ₂	4H ₂ O					4.04	2.54	1.63	1.09				17
18	Zinc chlorate	ZnClO ₃	6H ₂ O	145.0	152.5										18
19	chlorate	ZnClO ₃	4H ₂ O			200.3	209.2	223.2	273.1						19
20	nitrate	Zn(NO ₃) ₂	6H ₂ O	94.78		118.3									20
21	nitrate	Zn(NO ₃) ₂	3H ₂ O					206.9							21
22	sulfate	ZnSO ₄	7H ₂ O	41.9	47	54.4									22
23	sulfate	ZnSO ₄	6H ₂ O					70.1	76.8						23
24	sulfate	ZnSO ₄	1H ₂ O									86.6	83.7	80.8	24

Ilustración 14.3

TABLA A-4

Agua saturada. Tabla de temperaturas

Temp., T °C	Volumen específico, m ³ /kg			Energía interna, kJ/kg			Entalpía, kJ/kg			Entropía, kJ/kg · K		
	Pres. sat., P _{sat} kPa	Liq. sat., v _f	Vapor sat., v _g	Liq. sat., u _f	Evap., u _{fg}	Vapor sat., u _g	Liq. sat., h _f	Evap., h _{fg}	Vapor sat., h _g	Liq. sat., s _f	Evap., s _{fg}	Vapor sat., s _g
0.01	0.6117	0.001000	206.00	0.000	2374.9	2374.9	0.001	2500.9	2500.9	0.0000	9.1556	9.1556
5	0.8725	0.001000	167.03	21.019	2360.8	2381.8	21.020	2489.1	2510.1	0.0763	8.9487	9.0249
10	1.2281	0.001000	106.32	42.020	2346.5	2388.7	42.022	2477.2	2519.2	0.1511	8.7488	8.8999
15	1.7057	0.001001	77.885	62.980	2332.5	2395.5	62.982	2465.4	2528.3	0.2245	8.5559	8.7803
20	2.3392	0.001002	57.762	83.913	2318.4	2402.3	83.915	2453.5	2537.4	0.2965	8.3696	8.6661
25	3.1698	0.001003	43.340	104.83	2304.3	2409.1	104.83	2441.7	2546.5	0.3672	8.1899	8.5567
30	4.2469	0.001004	32.879	125.73	2290.2	2415.9	125.74	2429.8	2555.6	0.4368	8.0152	8.4520
35	5.6291	0.001006	25.205	146.63	2276.0	2422.7	146.64	2417.9	2564.6	0.5051	7.8466	8.3517
40	7.3851	0.001008	19.515	167.53	2261.9	2429.4	167.53	2406.0	2573.5	0.5724	7.6832	8.2556
45	9.5953	0.001010	15.251	188.43	2247.7	2436.1	188.44	2394.0	2582.4	0.6396	7.5247	8.1633
50	12.352	0.001012	12.026	209.33	2233.4	2442.7	209.34	2382.0	2591.3	0.7038	7.3710	8.0748
55	15.763	0.001015	9.5639	230.24	2219.1	2449.3	230.25	2369.8	2600.1	0.7680	7.2218	7.9898
60	19.947	0.001017	7.6570	251.16	2204.7	2455.9	251.18	2357.7	2608.8	0.8313	7.0769	7.9087
65	25.043	0.001020	6.1935	272.09	2190.3	2462.4	272.12	2345.4	2617.5	0.8937	6.9360	7.8296
70	31.202	0.001023	5.0396	293.04	2175.8	2468.9	293.07	2333.0	2626.1	0.9551	6.7989	7.7540
75	38.957	0.001026	4.1291	313.99	2161.3	2475.3	314.03	2320.6	2634.6	1.0158	6.6655	7.6812
80	47.416	0.001029	3.4053	334.97	2146.6	2481.6	335.02	2308.0	2643.0	1.0756	6.5355	7.6111
85	57.868	0.001032	2.8261	355.96	2131.9	2487.8	356.02	2295.3	2651.4	1.1346	6.4089	7.5435
90	70.183	0.001036	2.3593	376.97	2117.0	2494.0	377.04	2282.5	2659.6	1.1929	6.2853	7.4782
95	84.605	0.001040	1.9808	398.00	2102.0	2500.1	398.09	2269.6	2667.6	1.2504	6.1647	7.4151
100	101.42	0.001043	1.6720	419.06	2087.0	2506.0	419.17	2256.4	2675.6	1.3072	6.0470	7.3542
105	120.90	0.001047	1.4186	440.15	2071.8	2511.9	440.28	2243.1	2683.4	1.3634	5.9319	7.2952
110	143.38	0.001052	1.2094	461.27	2056.4	2517.7	461.42	2229.7	2691.1	1.4188	5.8193	7.2382
115	169.18	0.001056	1.0360	482.42	2040.9	2523.3	482.59	2216.0	2698.6	1.4737	5.7092	7.1829
120	198.67	0.001060	0.89133	503.60	2025.3	2528.9	503.81	2202.1	2706.0	1.5279	5.6013	7.1292
125	232.23	0.001065	0.77012	524.83	2009.5	2534.3	525.07	2188.1	2713.1	1.5816	5.4956	7.0771
130	270.28	0.001070	0.66808	546.10	1993.4	2539.5	546.38	2173.7	2720.1	1.6346	5.3919	7.0265
135	313.22	0.001075	0.58179	567.41	1977.3	2544.7	567.75	2159.1	2726.9	1.6872	5.2901	6.9773
140	361.53	0.001080	0.50850	588.77	1960.9	2549.6	589.16	2144.3	2733.5	1.7392	5.1901	6.9294
145	415.68	0.001085	0.44600	610.19	1944.2	2554.4	610.64	2129.2	2739.8	1.7908	5.0919	6.8827
150	476.16	0.001091	0.39248	631.66	1927.4	2559.1	632.18	2113.8	2745.9	1.8418	4.9953	6.8371
155	543.49	0.001096	0.34648	653.19	1910.3	2563.7	653.79	2098.0	2751.8	1.8924	4.9002	6.7927
160	618.23	0.001102	0.30680	674.79	1893.0	2568.2	675.47	2082.0	2757.5	1.9426	4.8066	6.7492
165	700.93	0.001108	0.27244	696.46	1875.4	2571.9	697.24	2065.6	2762.8	1.9923	4.7143	6.7067
170	792.18	0.001114	0.24260	718.20	1857.5	2575.7	719.08	2048.8	2767.9	2.0417	4.6233	6.6650
175	892.60	0.001121	0.21659	740.02	1839.4	2579.4	741.02	2031.7	2772.7	2.0905	4.5335	6.6242
180	1002.8	0.001127	0.19384	761.92	1820.9	2582.8	763.05	2014.2	2777.2	2.1392	4.4448	6.5841
185	1123.5	0.001134	0.17390	783.91	1802.1	2586.0	785.19	1996.2	2781.4	2.1875	4.3572	6.5447
190	1255.2	0.001141	0.15636	806.00	1783.0	2589.0	807.43	1977.9	2785.3	2.2355	4.2705	6.5059
195	1398.8	0.001149	0.14089	828.18	1763.6	2591.7	829.78	1959.0	2788.8	2.2831	4.1847	6.4678
200	1554.9	0.001157	0.12721	850.46	1743.7	2594.2	852.26	1939.8	2792.0	2.3305	4.0997	6.4302

TABLA A-4

Agua saturada. Tabla de temperaturas (continuación)

Temp., T °C	Volumen específico, m ³ /kg			Energía interna, kJ/kg			Entalpía, kJ/kg			Entropía, kJ/kg · K		
	Pres. sat., P _{sat} kPa	Liq. sat., v _f	Vapor sat., v _g	Liq. sat., u _f	Evap., u _{fg}	Vapor sat., u _g	Liq. sat., h _f	Evap., h _{fg}	Vapor sat., h _g	Liq. sat., s _f	Evap., s _{fg}	Vapor sat., s _g
205	1724.3	0.001164	0.11508	872.86	1723.5	2596.4	874.87	1920.0	2794.8	2.3776	4.0154	6.3930
210	1907.7	0.001173	0.10429	895.38	1702.9	2598.3	897.61	1899.7	2797.3	2.4245	3.9318	6.3509
215	2105.9	0.001181	0.094680	918.02	1681.9	2599.9	920.50	1878.8	2799.3	2.4712	3.8489	6.3100
220	2319.6	0.001190	0.086094	940.79	1660.5	2601.3	943.55	1857.4	2801.0	2.5176	3.7664	6.2700
225	2549.7	0.001199	0.078405	963.70	1638.6	2602.3	966.76	1835.4	2802.2	2.5639	3.6844	6.2309
230	2797.1	0.001209	0.071505	986.76	1616.1	2602.9	990.14	1812.8	2802.9	2.6100	3.6028	6.2100
235	3062.6	0.001219	0.065300	1010.0	1593.2	2603.2	1013.7	1789.5	2803.2	2.6560	3.5216	6.1700
240	3347.0	0.001229	0.059707	1033.4	1569.8	2603.1	1037.5	1765.5	2803.0	2.7018	3.4405	6.1400
245	3651.2	0.001240	0.054696	1056.9	1545.7	2602.7	1061.5	1740.8	2802.2	2.7476	3.3596	6.1100
250	3976.2	0.001252	0.050260	1080.7	1521.1	2601.8	1085.7	1715.3	2801.0	2.7933	3.2788	6.0700
255	4322.9	0.001263	0.046391	1104.7	1495.8	2600.5	1110.1	1689.0	2799.1	2.8390	3.1979	6.0300
260	4692.3	0.001276	0.042175	1128.8	1469.9	2598.7	1134.8	1661.8	2796.6	2.8847	3.1169	6.0000
265	5085.3	0.001289	0.038748	1153.3	1443.2	2596.5	1159.8	1633.7	2793.5	2.9304	3.0358	5.9600
270	5503.0	0.001303	0.035622	1177.9	1415.7	2593.7	1185.1	1604.6	2789.7	2.9762	2.9542	5.9300
275	5946.4	0.001317	0.032767	1202.9	1387.4	2590.3	1210.7	1574.5	2785.2	3.0221	2.8723	5.8900
280	6416.6	0.001333	0.030153	1228.2	1358.2	2586.4	1236.7	1543.2	2779.9	3.0681	2.7898	5.8500
285	6914.6	0.001349	0.027786	1253.7	1328.1	2581.8	1263.1	1510.7	2773.7	3.1144	2.7066	5.8100
290	7441.8	0.001366	0.025584	1279.7	1296.9	2576.5	1289.8	1476.9	2766.7	3.1608	2.6225	5.7800
295	7999.0	0.001384	0.023528	1306.0	1264.5	2570.5	1317.1	1441.6	2758.7	3.2076	2.5374	5.7400
300	8587.9	0.001404	0.021659	1332.7	1230.9	2563.6	1344.8	1404.8	2749.6	3.2548	2.4511	5.7000
305	9209.4	0.001425	0.019932	1360.0	1195.9	2555.8	1373.1	1366.3	2739.4	3.3024	2.3633	5.6600
310	9865.0	0.001447	0.018377	1387.7	1159.3	2547.1	1402.0	1325.9	2727.9	3.3506	2.2737	5.6200
315	10556	0.001472	0.016849	1416.1	1121.1	2537.2	1431.6	1283.4	2715.0	3.3994	2.1821	5.5800
320	11284	0.001499	0.015470	1445.1	1080.9	2526.0	1462.0	1238.5	2700.6	3.4491	2.0881	5.5300
325	12051	0.001528	0.014183	1475.0	1038.5	2513.4	1493.4	1191.0	2684.3	3.4998	1.9911	5.4900
330	12858	0.001560	0.012979	1505.7	993.5	2499.2	1525.8	1140.3	2666.0	3.5516	1.8906	5.4400
335	13707	0.001597	0.011848	1537.5	945.5	2483.0	1559.4	1086.0	2645.4	3.6050	1.7857	5.3900
340	14601	0.001638	0.010783	1570.7	893.8	2464.5	1594.6	1027.4	2622.0	3.6602	1.6756	5.3300
345	15541	0.001685	0.009772	1605.5	837.7	2443.2	1631.7	963.4	2595.1	3.7179	1.5585	5.2700
350	16529	0.001741	0.008806	1642.4	775.9	2418.3	1671.2	892.7	2563.9	3.7788	1.4326	5.2100
355	17570	0.001808	0.007872	1682.2	706.4	2388.6	1714.0	812.9	2526.9	3.8442	1.2942	5.1300
360	18666	0.001895	0.006950	1724.2	625.7	2351.9	1761.5	720.1	2481.6	3.9165	1.1373	5.0500
365	19822	0.002015	0.006009	1772.2	526.4	2303.6	1817.2	605.5	2422.7	4.0004	0.9489	4.9400
370	21044	0.002217	0.004953	1844.5	385.6	2230.1	1891.2	443.1	2334.3	4.1119	0.6890	4.8000
373.95	22264	0.002306	0.004306	2015.7	0	2015.7	0	2084.3	4.4070	0	4.4070	4.4070

Fuente: Las tablas A-4 a A-8 fueron generadas utilizando el programa para resolver ecuaciones de ingeniería (EES) desarrollado por S. A. Klein y F. L. Alvarado. La fuente utilizada en los cálculos es la altamente precisa Steam, IAPWS, que incorpora la Formulación 1995 para las Propiedades Termodinámicas de la Sustancia Agua Ordin

Tabla A-5

Agua saturada. Tabla de presiones

Pres., P kPa	Temp. sat., T _{sat} °C	Volumen específico, m ³ /kg		Energía interna, kJ/kg		Entalpía, kJ/kg		Entropía, kJ/kg · K				
		Liq. sat., v _f	Vapor sat., v _g	Liq. sat., u _f	Vapor sat., u _g	Liq. sat., h _f	Vapor sat., h _g	Liq. sat., s _f	Vapor sat., s _g			
1.0	6.97	0.001000	129.19	29.302	2355.2	2384.5	29.303	2484.4	2513.7	0.1059	8.6690	8.9749
1.5	13.02	0.001001	87.964	54.686	2338.1	2392.8	54.688	2470.1	2524.7	0.1956	8.6314	8.8270
2.0	17.50	0.001001	66.990	73.431	2325.5	2398.9	73.433	2459.5	2532.9	0.2606	8.4621	8.7227
2.5	21.08	0.001002	54.242	88.422	2315.4	2403.8	88.424	2451.0	2539.4	0.3118	8.3302	8.6421
3.0	24.08	0.001003	45.654	100.98	2306.9	2407.9	100.98	2443.9	2544.8	0.3543	8.2222	8.5765
4.0	28.96	0.001004	34.791	121.39	2293.1	2414.5	121.39	2432.3	2553.7	0.4224	8.0510	8.4734
5.0	32.87	0.001005	28.185	137.75	2282.1	2419.8	137.75	2423.0	2560.7	0.4762	7.9176	8.3938
7.5	43.29	0.001008	19.233	168.74	2261.1	2429.8	168.75	2405.3	2574.0	0.5763	7.6738	8.2501
10	45.81	0.001010	14.670	191.79	2245.4	2437.2	191.81	2392.1	2583.9	0.6492	7.4996	8.1488
15	53.97	0.001014	10.020	225.93	2222.1	2448.0	225.94	2372.3	2598.3	0.7549	7.2522	8.0071
20	60.06	0.001017	7.6481	251.40	2204.6	2456.0	251.42	2357.5	2608.9	0.8320	7.0752	7.9073
25	64.96	0.001020	6.2034	271.93	2190.4	2462.4	271.96	2345.5	2617.5	0.8932	6.9370	7.8302
30	69.09	0.001022	5.2287	289.24	2178.5	2467.7	289.27	2335.3	2624.6	0.9441	6.8234	7.7675
40	75.86	0.001026	3.9933	317.58	2158.8	2476.3	317.62	2318.4	2636.1	1.0261	6.6430	7.6691
50	81.32	0.001030	3.2403	340.49	2142.7	2483.2	340.54	2304.7	2645.2	1.0912	6.5019	7.5931
75	91.76	0.001037	2.2172	384.36	2111.8	2496.1	384.44	2278.0	2662.4	1.2132	6.2426	7.4558
100	99.61	0.001043	1.6941	417.40	2088.2	2505.6	417.51	2257.5	2675.0	1.3028	6.0562	7.3589
101.325	99.97	0.001043	1.6734	418.95	2087.0	2506.0	419.06	2256.5	2675.6	1.3069	6.0476	7.3545
125	105.97	0.001048	1.3750	444.23	2068.8	2513.0	444.36	2240.6	2684.9	1.3741	5.9100	7.2841
150	111.35	0.001053	1.1694	466.97	2052.3	2519.2	467.13	2226.0	2693.1	1.4337	5.7894	7.2231
175	116.04	0.001057	1.0037	486.82	2037.7	2524.5	487.01	2213.1	2700.2	1.4850	5.6865	7.1716
200	120.21	0.001061	0.88578	504.50	2024.6	2529.1	504.71	2201.6	2706.3	1.5302	5.5968	7.1270
225	123.97	0.001064	0.79329	520.47	2012.7	2533.2	520.71	2191.0	2711.7	1.5706	5.5171	7.0877
250	127.41	0.001067	0.71873	535.08	2001.8	2536.8	535.35	2181.2	2716.5	1.6072	5.4453	7.0525
275	130.58	0.001070	0.65732	548.57	1991.6	2540.1	548.86	2172.0	2720.9	1.6408	5.3800	7.0207
300	133.52	0.001073	0.60582	561.11	1982.1	2543.2	561.43	2163.5	2724.9	1.6717	5.3200	6.9917
325	136.27	0.001076	0.56199	572.84	1973.1	2545.9	573.19	2155.4	2728.6	1.7005	5.2645	6.9650
350	138.85	0.001079	0.52422	583.89	1964.6	2548.5	584.26	2147.7	2732.0	1.7274	5.2128	6.9402
375	141.30	0.001081	0.49133	594.32	1956.6	2550.9	594.73	2140.4	2735.1	1.7526	5.1645	6.9171
400	143.61	0.001084	0.46242	604.22	1948.9	2553.1	604.66	2133.4	2738.1	1.7765	5.1191	6.8955
450	147.30	0.001088	0.41392	622.65	1934.5	2557.1	623.14	2120.3	2743.4	1.8205	5.0356	6.8561
500	151.23	0.001093	0.37483	639.54	1921.2	2560.7	640.09	2108.0	2748.1	1.8604	4.9603	6.8207
550	155.45	0.001097	0.34261	655.16	1908.8	2563.9	655.77	2096.6	2752.4	1.8970	4.8916	6.7886
600	159.93	0.001101	0.31560	669.72	1897.1	2566.8	670.38	2085.8	2756.2	1.9308	4.8285	6.7593
650	164.38	0.001104	0.29260	683.37	1886.1	2569.4	684.08	2075.5	2759.6	1.9623	4.7699	6.7322
700	168.75	0.001108	0.27278	696.23	1875.6	2571.8	697.00	2065.8	2762.8	1.9918	4.7153	6.7071
750	173.05	0.001111	0.25552	708.40	1865.6	2574.0	709.24	2056.4	2765.7	2.0195	4.6642	6.6837

Tabla A-5

Agua saturada. Tabla de presiones (conclusión)

Pres., P kPa	Temp. sat., T _{sat} °C	Volumen específico, m ³ /kg		Energía interna, kJ/kg		Entalpía, kJ/kg		Entropía, kJ/kg · K				
		Liq. sat., v _f	Vapor sat., v _g	Liq. sat., u _f	Vapor sat., u _g	Liq. sat., h _f	Vapor sat., h _g	Liq. sat., s _f	Vapor sat., s _g			
800	170.41	0.001115	0.24035	719.97	1856.1	2576.0	720.87	2047.5	2768.3	2.0457	4.6160	6.6636
850	172.94	0.001118	0.22690	731.00	1846.9	2577.9	731.95	2038.8	2770.8	2.0705	4.5705	6.6401
900	175.35	0.001121	0.21489	741.55	1838.1	2579.6	742.56	2030.5	2773.0	2.0941	4.5273	6.621
950	177.66	0.001124	0.20411	751.67	1829.6	2581.3	752.74	2022.4	2775.2	2.1166	4.4862	6.6027
1000	179.88	0.001127	0.19436	761.39	1821.4	2582.8	762.51	2014.6	2777.1	2.1381	4.4470	6.5850
1100	184.06	0.001133	0.17745	779.78	1805.7	2585.5	781.03	1999.6	2780.7	2.1785	4.3735	6.5520
1200	187.96	0.001138	0.16326	796.96	1790.9	2587.8	798.33	1985.4	2783.8	2.2159	4.3058	6.5217
1300	191.60	0.001144	0.15119	813.10	1776.8	2589.9	814.59	1971.9	2786.5	2.2508	4.2428	6.4934
1400	195.04	0.001149	0.14078	828.35	1763.4	2591.8	829.96	1958.9	2788.9	2.2835	4.1840	6.4671
1500	198.29	0.001154	0.13171	842.82	1750.6	2593.4	844.55	1946.4	2791.0	2.3143	4.1287	6.4430
1750	205.72	0.001166	0.11344	876.12	1720.6	2596.7	878.16	1917.1	2795.2	2.3844	4.0033	6.3877
2000	212.38	0.001177	0.099587	906.12	1693.0	2599.1	908.47	1889.8	2798.3	2.4467	3.8923	6.3390
2250	218.41	0.001187	0.088717	933.54	1667.3	2600.9	936.21	1864.3	2800.5	2.5029	3.7926	6.2950
2500	223.95	0.001197	0.079952	958.87	1643.2	2602.1	961.87	1840.1	2801.9	2.5542	3.7016	6.2556
3000	233.85	0.001217	0.066667	1004.6	1598.5	2603.2	1008.3	1794.9	2803.2	2.6454	3.5402	6.1856
3500	242.56	0.001235	0.057061	1045.4	1557.6	2603.0	1049.7	1753.0	2802.7	2.7253	3.3991	6.1244
4000	250.35	0.001252	0.049779	1082.4	1519.3	2601.7	1087.4	1713.5	2800.8	2.7966	3.2731	6.0690
5000	263.94	0.001286	0.039448	1148.1	1448.9	2597.0	1154.5	1639.7	2794.2	2.9207	3.0530	5.9737
6000	275.59	0.001319	0.032449	1205.8	1384.1	2589.9	1213.8	1570.9	2784.6	3.0275	2.8627	5.8902
7000	285.83	0.001352	0.027378	1258.0	1323.0	2581.0	1267.5	1505.2	2772.6	3.1220	2.6927	5.8148
8000	295.01	0.001384	0.023525	1306.0	1264.5	2570.5	1317.1	1441.6	2758.7	3.2077	2.5373	5.7450
9000	303.35	0.001418	0.020489	1350.9	1207.6	2558.5	1363.7	1379.3	2742.9	3.2866	2.3925	5.6791
10,000	311.00	0.001452	0.018028	1393.3	1151.8	2545.2	1407.8	1317.6	2725.5	3.3603	2.2556	5.6159
11,000	318.08	0.001488	0.015988	1433.9	1096.6	2530.4	1450.2	1256.1	2706.3	3.4299	2.1245	5.5544
12,000	324.68	0.001526	0.014264	1473.0	1041.3	2514.3	1491.3	1194.1	2685.4	3.4964	1.9975	5.4939
13,000	330.85	0.001566	0.012781	1511.0	985.5	2496.6	1531.4	1131.3	2662.7	3.5606	1.8730	5.4336
14,000	336.67	0.001610	0.011487	1548.4	928.7	2477.1	1571.0	1067.0	2637.9	3.6232	1.7497	5.3728
15,000	342.16	0.001657	0.010361	1585.5	870.3	2455.7	1610.3	1000.5	2610.8	3.6848	1.6261	5.3100
16,000	347.36	0.001710	0.009312	1622.6	809.4	2432.0	1649.9	931.1	2581.0	3.7461	1.5005	5.2466
17,000	352.29	0.001770	0.008374	1660.2	745.1	2405.4	1690.3	857.4	2547.7	3.8082	1.3709	5.1791
18,000	356.99	0.001840	0.007504	1699.1	675.9	2375.0	1732.2	777.8	2510.0	3.8720	1.2343	5.1064
19,000	361.47	0.001926	0.006677	1740.3	598.9	2339.2	1776.8	689.2	2466.0	3.9396	1.0860	5.0256
20,000	365.75	0.002038	0.005862	1785.8	509.0	2294.8	1826.6	585.5	2412.1	4.0146	0.9164	4.9310
21,000	369.83	0.002207	0.004994	1841.6	391.9	2233.5	1888.0	450.4	2338.4	4.1071	0.7005	4.8076
22,000	373.71	0.002703	0.003644	1951.7	140.8	2092.4	2011.1	161.5	2172.6	4.2942	0.2496	4.5439
22,064	373.95	0.003106	0.003106	2015.7	0	2015.7	2084.3	0	2084.3	4.4070	0	4.4070

Ilustración 14.5

TABLE 1: COMMERCIAL EQUIPMENT INDEX FACTORS

2011 Cost = 100	
<i>Year</i>	<i>Average</i>
2011	100
2010	104
2009	103
2008	106
2007	110
2006	115
2005	120
2004	128
2003	132
2002	134
2001	135
2000	136
1999	138
1998	139
1997	140
1996	142
1995	144
1994	149
1993	153
1992	157
1991	159
1990	162
1989	166
1988	175
1987	182
1986	185
1985	187
1984	190
1983	196
1982	200
1981	209
1980	230
1979	250
1978	273
1977	294
1976	308
1975	327
1974	361
1973	415
1972	430

Ilustración 14.6

TABLE 2: INDUSTRIAL MACHINERY AND EQUIPMENT INDEX FACTORS

2011 Cost = 100	
<i>Year</i>	<i>Average</i>
2011	100
2010	103
2009	103
2008	104
2007	108
2006	111
2005	115
2004	119
2003	123
2002	123
2001	123
2000	124
1999	125
1998	126
1997	128
1996	130
1995	132
1994	136
1993	130
1992	141
1991	144
1990	148
1989	152
1988	150
1987	166
1986	160
1985	171
1984	176
1983	180
1982	184
1981	193
1980	213
1979	237
1978	261
1977	284
1976	304
1975	323
1974	376
1973	444
1972	462

Ilustración 14.7