



UNIVERSIDAD  
POLITECNICA  
DE VALENCIA

# Extracción de metales por hidrometalurgia: Procesamiento de cobre y cinc

<b>Apellidos, nombre</b>	Muñoz Portero, María José (mjmunoz@iqn.upv.es)
<b>Departamento</b>	Ingeniería Química y Nuclear
<b>Centro</b>	Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales



## 1 Resumen de las ideas clave

En este artículo vamos a describir y comparar el **procesamiento de distintos materiales metálicos mediante hidrometalurgia**, como es el caso del cobre y el cinc. Todo ello lo veremos a través de ejemplos prácticos para facilitar el aprendizaje de los conceptos básicos descritos en el presente documento.

## 2 Objetivos

Una vez que el alumno se lea con detenimiento este documento, será capaz de:

- Describir el procesamiento de distintos materiales metálicos mediante hidrometalurgia.
- Comparar el procesamiento de distintos materiales metálicos mediante hidrometalurgia.

## 3 Introducción

Los materiales metálicos (metales y aleaciones metálicas) son **sustancias inorgánicas** que están compuestas de uno o más **elementos metálicos** (por ejemplo, hierro, cobre, aluminio, níquel, cinc, titanio, etc.), pudiendo contener también algunos elementos no metálicos (por ejemplo, carbono, nitrógeno y oxígeno). Los materiales metálicos tienen una **estructura cristalina** en la que los átomos están dispuestos de manera ordenada. Tienen un gran número de electrones deslocalizados, que no pertenecen a ningún átomo en concreto, constituyendo el **enlace metálico** [1-6].

Los materiales metálicos tienen en general buena conductividad eléctrica y térmica, resistencia relativamente alta, alta rigidez, ductilidad o conformabilidad, resistencia al impacto, etc.

Aunque en ocasiones se utilizan metales puros, las combinaciones de metales conocidas como **aleaciones** proporcionan mejoría en alguna propiedad particularmente deseable o permiten una mejor combinación de propiedades. Una **aleación metálica** es un material metálico compuesto de dos o más elementos, de los cuales por lo menos uno es metálico.

Los materiales metálicos se clasifican en dos grandes grupos: 1) **metales y aleaciones ferrosas**, que contienen un alto porcentaje de hierro, como por ejemplo, el acero y el hierro fundido y 2) **metales y aleaciones no ferrosas**, que no contienen hierro o, si lo contienen, es solo en un porcentaje relativamente pequeño, como por ejemplo, el cobre y el cinc.

Los metales muestran una fuerte tendencia a formar **iones positivos (cationes)** por pérdida de electrones, y son, por tanto, **agentes reductores**, tanto más fuertes cuanto mayor sea su **carácter metálico**. En el sistema periódico el carácter metálico aumenta de derecha a izquierda y de arriba abajo. Los metales más activos (más reductores) son los situados en el ángulo inferior-izquierdo de la tabla periódica (bario, radio, cesio y francio).



Son muy pocos los metales que en la naturaleza se encuentran en estado nativo, siendo éstos, principalmente, los metales preciosos. Normalmente los metales se encuentran en la naturaleza combinados químicamente con otros elementos, formando compuestos de diversas clases, como por ejemplo, óxidos, carbonatos, sulfuros, silicatos y haluros. Estos compuestos no se encuentran con frecuencia puros, sino mezclados con otras materias formando los **minerales**.

La extracción de los metales a partir de los minerales puede realizarse de dos formas: 1) **proceso por pirometalurgia** y 2) **proceso por hidrometalurgia** [7]. La diferencia entre ambos procesos es que el proceso por pirometalurgia se realiza por vía seca a altas temperaturas, mientras que el proceso por hidrometalurgia se realiza por vía húmeda a bajas temperaturas. En este documento vamos a ver la **extracción de metales por hidrometalurgia**.

## 4 Desarrollo

Ahora vamos a ver como se realiza la extracción de metales mediante hidrometalurgia. Para ello vamos a describir el procesamiento de distintos materiales metálicos por hidrometalurgia, como es el caso del cobre y el cinc. Finalmente vamos a realizar una comparación entre el procesamiento por hidrometalurgia de los dos materiales metálicos.

### 4.1 Extracción de metales por hidrometalurgia

La extracción de metales por **hidrometalurgia** se lleva a cabo mediante operaciones por **vía húmeda** que se realizan a través de reacciones en fase acuosa y a bajas temperaturas.

En general los minerales que se extraen de la naturaleza no son puros, sino que están mezclados con **materias estériles**, que constituyen la **ganga** del mineral. Estas materias se encuentran en la naturaleza rodeando al mineral propiamente dicho (**mena**) y no se pueden separar al arrancar el mineral en condiciones económicas y ventajosas.

La secuencia del procesamiento de los materiales metálicos por hidrometalurgia incluye las siguientes etapas [7], tal como puedes ver en la Figura 1:

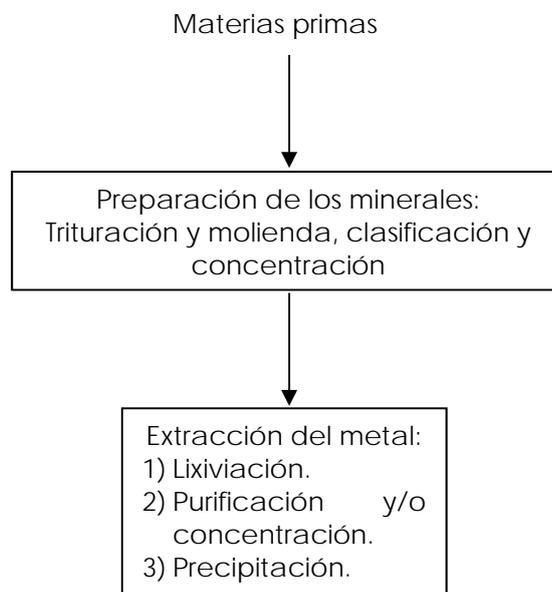


Figura 1. Diagrama de flujo del procesamiento de los materiales metálicos por hidrometalurgia.

- 1) **Preparación de los minerales.** Las principales operaciones de preparación de los minerales son:
  - **Trituración y molienda:** tienen por objeto reducir el tamaño de los minerales, siendo más pequeño el tamaño de las partículas obtenidas tras la operación de molienda. La trituración se realiza con materiales secos, mientras que la molienda puede hacerse con materiales secos o húmedos.
  - **Concentración:** tiene por objeto separar de un mineral la mayor parte de la ganga, de forma que el mineral quedará enriquecido o concentrado. La flotación es la operación más empleada para la concentración de las menas utilizadas en hidrometalurgia.
- 2) **Extracción del metal.** La extracción del metal por hidrometalurgia se realiza mediante las siguientes operaciones, una a continuación de la otra:
  - **Lixiviación:** operación en la que tiene lugar el ataque químico, en fase acuosa, del metal valioso contenido en la mena mineral. Puede ser ácida, básica o neutra dependiendo del carácter del reactivo químico utilizado, que a su vez es función de la ganga del mineral.
  - **Purificación y/o concentración:** operación que se realiza sobre la disolución obtenida en la etapa anterior de lixiviación. El objetivo de esta operación es retirar determinadas impurezas de la disolución antes de que ésta sea sometida a la etapa siguiente de precipitación. Se suele realizar mediante los siguientes métodos:
    - Métodos químicos de precipitación.
    - Cementación (reacción de desplazamiento similar a la metalotermia pero en fase acuosa).
    - Utilizando cualquiera de las reacciones de la química convencional que sirven para retirar un metal de una fase acuosa.



- Extracción con disolventes (en el caso de disoluciones muy diluidas).
- Separación con resinas de intercambio iónico (en el caso de disoluciones muy diluidas).
- **Precipitación:** el objetivo de esta operación es separar el metal valioso de la disolución, en forma elemental (casi siempre) o en forma oxidada (en raras ocasiones). Se suele realizar mediante los siguientes métodos:
  - Electrólisis (como es el caso del cobre).
  - Cementación (como es el caso de las disoluciones cianuradas de oro).
  - Métodos convencionales de química, como por ejemplo, la precipitación de metales con hidrógeno gaseoso a presión y temperaturas altas (como es el caso del níquel y el cobre).

A continuación vamos a ver dos ejemplos de procesamiento de materiales metálicos por hidrometalurgia. El primer ejemplo corresponde al procesamiento del cobre y el segundo ejemplo corresponde al procesamiento del cinc [7].

## 4.2 Procesamiento de cobre por hidrometalurgia

### 4.2.1 Materias primas

Las materias primas utilizadas en el procesamiento del cobre por hidrometalurgia son **minerales oxidados**. Los minerales oxidados de cobre se originan en la descomposición y oxidación de los minerales sulfurados. Fueron los primeros minerales explotados. Los principales minerales oxidados son la **malaquita** ( $\text{Cu}_2\text{CO}_3(\text{OH})_2$ ), la **azurita** ( $\text{Cu}_3(\text{CO}_3)_2(\text{OH})_2$ ), la **crisocola** ( $(\text{Cu,Al})_4\text{H}_4(\text{OH})_8\text{Si}_4\text{O}_{10}\cdot n\text{H}_2\text{O}$ ), la **cuprita** ( $\text{Cu}_2\text{O}$ ) y la **brochantita** ( $\text{Cu}_4\text{SO}_4(\text{OH})_6$ ).

### 4.2.2 Preparación de los minerales

Los minerales oxidados una vez extraídos se someten a operaciones de **trituration y molienda** para reducir el tamaño de partícula.

### 4.2.3 Extracción del cobre

El proceso hidrometalúrgico de extracción del cobre a partir de minerales oxidados se realiza mediante tres etapas consecutivas:

- **Lixiviación:** tiene por objetivo la obtención del cobre de los minerales oxidados que lo contienen, aplicando una disolución de ácido sulfúrico y agua. Este proceso se basa en que los minerales oxidados son sensibles al ataque de disoluciones ácidas. Se realiza mediante el "heap leaching" (lixiviación en pilas), consistente en el apilamiento de grandes cantidades de minerales que se riegan con disoluciones diluidas de ácido sulfúrico formando una **disolución de sulfato de cobre** ( $\text{CuSO}_4$ ). Estas pilas se realizan encima de superficies previamente impermeabilizadas y preparadas para recoger todo el líquido procedente de la lixiviación, que contienen óxidos de cobre así como sulfuros. Este proceso se alarga durante meses o incluso años hasta que se agota el cobre de la pila de material. De la lixiviación se obtienen disoluciones de sulfato de cobre con concentraciones de hasta 9 g/l de cobre.



- **Purificación/Concentración:** las disoluciones obtenidas en la etapa anterior de lixiviación no contienen suficiente cobre, por lo que se extrae este cobre con **disolventes orgánicos** para separarlo de otras impurezas. A posteriori se extrae una disolución concentrada de cobre de estos disolventes. Mediante la extracción con disolventes se obtienen disoluciones de sulfato de cobre con concentraciones de hasta 45 g/l de cobre.
- **Electrólisis-Electrodeposición:** la disolución resultante en la etapa anterior de purificación/concentración se electroliza en grandes plantas con **cátodos de acero inoxidable** y **ánodos inertes de plomo-antimonio**. Finalizada la electrólisis se extrae **cobre sólido del 99,99% de pureza**. Esta última electrólisis tiene elevado coste energético.

## 4.3 Procesamiento de cinc por hidrometalurgia

### 4.3.1 Materias primas

Las materias primas utilizadas en el procesamiento del cinc por hidrometalurgia son:

- **Minerales sulfurados:** frecuentemente son mezclas de sulfuros de cinc y hierro, combinados con compuestos de otros diferentes elementos. El mineral más importante es la **esfalerita o blenda** ( $ZnS$ ).
- **Minerales oxidados:**
  - **Smithsonita (esmitsonita):** carbonato de cinc ( $ZnCO_3$ ).
  - **Hemimorfita (calamina):** silicato de cinc ( $4ZnO \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$ ).
  - **Cincita:** óxido de cinc ( $ZnO$ ).
  - **Franklinita:** óxido mixto de hierro y cinc ( $ZnO \cdot Fe_2O_3$ ).

Las menas más comúnmente utilizadas como fuente de cinc son la **esmitsonita** y la **esfalerita o blenda**.

### 4.3.2 Preparación de los minerales

Las menas de cinc, principalmente la blenda, se someten a una serie de etapas de preparación de los minerales:

- **Trituración y molienda:** tiene como objetivo la reducción del tamaño de partícula del mineral.
- **Concentración:** tiene como objetivo la concentración del mineral en el caso de menas mixtas. La concentración de menas se realiza mediante la técnica de **flotación**, obteniéndose el concentrado de cinc.

### 4.3.3 Extracción del cinc

El proceso hidrometalúrgico de extracción del cinc a partir de los minerales se realiza mediante las siguientes etapas consecutivas:



- **Tostación:** los minerales sulfurados, como es el caso de la blenda, se someten a una tostación oxidante de modo que el contenido metálico de la mena pueda ser recuperado fácilmente. Esta conversión del sulfuro de cinc ( $ZnS$ ) en óxido de cinc ( $ZnO$ ) se exige puesto que el sulfuro no se ataca con facilidad por ácidos o bases. Si el contenido de hierro es alto en la blenda, la formación de **ferrita de cinc,  $ZnO \cdot Fe_2O_3$** , es inmediata y completa.
- **Lixiviación:** tiene por objetivo disolver el tostado de la blenda, el óxido de cinc,  $ZnO$  (s) (calcina), en una **disolución diluida de ácido sulfúrico (100-150 g/l)**, formando una disolución de **sulfato de cinc ( $ZnSO_4$ )**; esta concentración de ácido sólo permite disolver el  $ZnO$ , quedando las ferritas formadas en la tostación,  **$ZnO \cdot Fe_2O_3$ , inatacadas**. Para mejorar la recuperación del cinc y evitar así pérdidas de metal se efectúa la **lixiviación ácida en caliente (90-95°C)** durante 2-4 horas. Bajo estas condiciones no solo se disuelve el cinc sino también el hierro asociado a la **ferrita de cinc (franklinita)**, obteniéndose una **disolución rica en cinc que contiene entre 15-30 g/l** de hierro (principalmente en forma férrica) que debe ser eliminado de la misma.
- **Neutralización y precipitación de hierro:** tiene por objetivo precipitar el hierro, con el que coprecipitan impurezas como el As, Sb y Ge. También se coprecipitan sílice coloidal e hidróxido de aluminio. La precipitación de  $Fe^{+3}$  se efectúa como **jarosita,  $M_2Fe_6(SO_4)_4(OH)_{12}$**  (donde  $M = Pb, Na, K, NH_4$ ) o como **goetita,  $FeOOH$** .
- **Purificación:** tiene por objetivo eliminar algunos elementos presentes en la disolución obtenida en la etapa anterior, los cuales están en forma de sulfato metálico en la disolución. Dicha eliminación se realiza con la adición de cinc en polvo. Por medio de esta adición precipitan metales como Cu, Co, Cd, Ni, As, Sb y Ge. Esto es posible debido a la **cementación** de los mencionados metales por el cinc, que es menos noble que ellos.
- **Electrólisis:** una vez purificada la disolución, ésta se pasa a la instalación de electrólisis para la recuperación metálica. La disolución resultante se electroliza en grandes plantas con **cátodos de aluminio y ánodos inertes de plomo-plata**. Finalizada la electrólisis se extrae **cinc sólido del 99,99% de pureza**. Esta última electrólisis tiene elevado coste energético.

#### 4.4 Comparación del procesamiento por hidrometalurgia de cobre y cinc

En la Tabla 1 puedes ver una comparación del procesamiento por hidrometalurgia del cobre y el cinc.

Respecto a los minerales metálicos, para la obtención del cobre por hidrometalurgia se parte de **minerales oxidados**, mientras que en el caso del cinc se parte tanto de **minerales sulfurados** como de **minerales oxidados**.

Respecto a la preparación de los minerales, en los dos casos se realiza una primera etapa de **trituración y molienda** para la reducción del tamaño de partícula. En el caso del procesamiento del cinc se necesita una etapa posterior de **concentración** de la mena por flotación.



Respecto a la extracción del metal, en el caso del procesamiento del cobre se realiza mediante las siguientes etapas en serie: **1) lixiviación, 2) purificación/concentración mediante extracción con disolventes orgánicos y 3) electrólisis-electrodeposición.** En el caso del procesamiento del cinc la extracción del metal se realiza mediante las mismas etapas, salvo dos consideraciones. La primera consideración es que en el caso de menas sulfuradas de cinc hay que realizar una **tostación** antes del proceso de lixiviación, para que de esa forma todo el sulfuro de cinc pase a óxido de cinc. La segunda consideración es que la etapa de purificación/concentración en el caso del cinc se realiza en dos fases: primero se realiza una **neutralización y precipitación del hierro** y después se realiza una **purificación** mediante cementación para eliminar el resto de metales presentes en la disolución como impurezas.

Etapas	Cobre	Cinc
Minerales metálicos	Minerales oxidados: - Malaquita ( $\text{Cu}_2\text{CO}_3(\text{OH})_2$ ). - Azurita ( $\text{Cu}_3(\text{CO}_3)_2(\text{OH})_2$ ). - Crisocola ( $((\text{Cu},\text{Al})_4\text{H}_4(\text{OH})_8\text{Si}_4\text{O}_{10} \cdot n\text{H}_2\text{O})$ ). - Cuprita ( $\text{Cu}_2\text{O}$ ). - Brochantita ( $\text{Cu}_4\text{SO}_4(\text{OH})_6$ ).	Minerales sulfurados: - Esfalerita o blenda ( $\text{ZnS}$ ).  Minerales oxidados: - Smithsonita o esmitsonita ( $\text{ZnCO}_3$ ). - Hemimorfita o calamina ( $4\text{ZnO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ). - Cincita u óxido de cinc ( $\text{ZnO}$ ). - Franklinita u óxido mixto de hierro y cinc ( $\text{ZnO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ ).
Preparación de los minerales	1) Trituración y molienda.	1) Trituración y molienda. 2) Concentración: Flotación.
Extracción del metal	1) Lixiviación. 2) Purificación/Concentración: Extracción con disolventes orgánicos. 3) Electrólisis-Electrodeposición.	1) Tostación. 2) Lixiviación. 3) Neutralización y precipitación de hierro. 4) Purificación. 5) Electrólisis.

Tabla 1. Procesamiento por hidrometalurgia de cobre y cinc.

## 5 Cierre

A lo largo de este documento hemos aprendido cómo se realiza la extracción de metales mediante hidrometalurgia, poniendo como ejemplos el caso del procesamiento del cobre y el cinc, y realizando finalmente una comparación entre el procesamiento por hidrometalurgia de los dos materiales metálicos.



## 6 Bibliografía

[1] Muñoz-Portero, M.J.: "Principios de Obtención de Materiales", Editorial UPV, 2007.

[2] Groover, M.P.: "Fundamentos de manufactura moderna", Prentice-Hall Hispanoamericana, 1997.

[3] Smith, W.F.: "Fundamentos de la Ciencia e Ingeniería de Materiales", McGraw-Hill, 1999.

[4] Shackelford, J.F.; Güemes, A.: "Introducción a la Ciencia de los Materiales para Ingenieros", Pearson Educación, 2010.

[5] Askeland, D.R.: "Ciencia e Ingeniería de los Materiales", Paraninfo, 2001.

[6] William, D.; Callister, Jr.: "Introducción a la Ciencia e Ingeniería de los Materiales", Reverté, 2000.

[7] Ballester, A.; Verdeja, L.F.; Sancho, J.: "Metalurgia extractiva: Volumen I y II", Síntesis, 2000.