

PROCESOS DE FABRICACION DE METALES NO FERROSOS

GUIA DE ESTUDIO DE LA UNIDAD IV

UNIDAD IV REFINACION DE METALES

Competencia específica a desarrollar: Comprende y aplica los fundamentos teórico práctico de las técnicas empleadas en la refinación de los metales no ferrosos.

4.1. Condiciones de equilibrio para separación, destilación y refinación.

Introducción

Es una reacción que nunca llega a completarse, pues se produce simultáneamente en ambos sentidos (los reactivos forman productos, y a su vez, éstos forman de nuevo reactivos). Es decir, se trata de un equilibrio dinámico. Cuando las concentraciones de cada una de las sustancias que intervienen (reactivos o productos) se estabiliza, es decir, se gastan a la misma velocidad que se forman, se llega al EQUILIBRIO QUÍMICO. El estado de equilibrio de las reacciones químicas reversibles en sistemas a P y T constantes tiene las siguientes características:

- a) La composición de los componentes de la reacción no varía en el tiempo. Por eso, es posible definir una constante de equilibrio.
- b) La reacción directa y la reacción inversa conducen al mismo estado de equilibrio.
- c) El equilibrio es dinámico.

De los factores que afectan la velocidad de una reacción, solamente alteran el punto de equilibrio de dicha reacción: la concentración de las sustancias involucradas en la reacción, la presión, cuando reactivos y productos son gases y la temperatura.

A finales del siglo XIX, el químico francés Henry le Châtelier (1850- 1936) postuló que cuando en un sistema en equilibrio se modifica cualquiera de los factores mencionados, se afecta la velocidad de la reacción y el punto de equilibrio se desplaza en la dirección que tienda a contrarrestar el efecto primario de dicha alteración.

Los cambios en la materia que todo cambio químico involucra una reacción entre diferentes sustancias produciendo la formación de sustancias nuevas. Podemos decir, entonces, que una reacción química es un proceso en que una o más sustancias se transforman en otra u otras sustancias de diferente naturaleza. Las sustancias originales (las que se transformarán) se denominan reactantes o reactivos y las finales se llaman productos.

Todos los procesos químicos evolucionan desde los reactantes hasta la formación de productos a una determinada velocidad hasta que la reacción se completa. En ese momento, la velocidad de formación de los productos es igual a la velocidad de descomposición de éstos para formar nuevamente los reactantes de los que proceden. Desde ese mismo momento las concentraciones de todas las especies reaccionantes (reactantes y productos) permanecen constantes. Ese estado se conoce con el nombre de equilibrio químico.

El equilibrio químico es un estado en el que no se observan cambios visibles en el sistema. Sin embargo, a nivel molecular existe una gran actividad debido a que las moléculas de reactantes siguen produciendo moléculas de productos, y estas a su vez siguen formando moléculas de productos.

Cuando se alcanza el equilibrio químico las velocidades de la reacción directa (\Rightarrow) e inversa (\Leftarrow) son iguales y las concentraciones de los reactantes y de los productos permanecen constantes. Para que esto ocurra, la reacción debe suceder a una temperatura y presión constantes en un recipiente cerrado en el que ninguna sustancia pueda entrar o salir. Es importante diferenciar entre el equilibrio en términos de velocidad, en el que ambas velocidades son iguales, del equilibrio en términos de concentraciones, donde éstas pueden ser, y normalmente son, distintas.

▲ Factores que modifican el equilibrio

Existen diversos factores capaces de modificar el estado de equilibrio en un proceso químico, como son: la temperatura, la presión (afectando al volumen) y las concentraciones. La influencia de estos tres factores se puede predecir, de una manera cualitativa por el Principio de Le Chatelier, que dice lo siguiente:

Si en una reacción química en equilibrio se modifican la presión, la temperatura o la concentración de alguna de las especies reaccionantes, la reacción evolucionará en uno u otro sentido hasta alcanzar un nuevo estado de equilibrio. Este principio es equivalente al principio de la conservación de la energía.

➤ Efecto de la temperatura

Es la única variable que, además de influir en el equilibrio, modifica el valor de su constante. Si una vez alcanzado el equilibrio se aumenta la temperatura, el sistema se opone a ese aumento de energía calorífica desplazándose en el sentido que absorba calor; es decir, hacia el sentido que marca la reacción endotérmica. Aquí debemos recordar que en las reacciones químicas existen dos tipos de variación con la temperatura:

Exotérmica : aquella que libera o desprende calor.

Endotérmica : aquella que absorbe el calor.

Es importante hacer notar que a bajas temperaturas, la reacción requiere más tiempo, debido a que bajas temperaturas reducen la movilidad de las partículas involucradas. Para contrarrestar este efecto se utiliza un catalizador para acelerar la reacción.

Respecto a los catalizadores, se ha determinado que estos no tienen ningún efecto sobre la concentración de los reaccionantes y de los productos en equilibrio. Esto se debe a que si un catalizador acelera la reacción directa también hace lo mismo con la reacción inversa, de modo que si ambas reacciones se aceleran en la misma proporción, no se produce ninguna alteración del equilibrio.

➤ Efecto de la presión

Si aumenta la presión la reacción se desplazará hacia donde exista menor número de moles gaseosos, para así contrarrestar el efecto de disminución de volumen, y viceversa. Lógicamente, en el caso de que las cantidades de moles gaseosos sean iguales para cada lado de la ecuación, no se producirán cambios, es decir que el equilibrio no se desplazará. También se puede aumentar la presión del sistema sin afectar el equilibrio agregando un gas noble.

➤ Efecto de las concentraciones

Un aumento en la concentración de uno de los reactivos hace que el equilibrio se desplace hacia la formación de productos, y a la inversa en el caso de que se disminuya dicha concentración. Y un aumento en la concentración de los productos hace que el equilibrio se desplace hacia la formación de reactivos, y viceversa en el caso de que se disminuya.

De todos los metales y aleaciones utilizados para la industria, aproximadamente el 20% corresponde a los no ferrosos. Muy pocos se emplean en estado de metal prácticamente puro. En este sentido se puede mencionar el cobre electrolítico, cuya elevada conductividad lo hace apto para prestaciones exigentes en la conducción de electricidad.

También se encuentran en esta categoría algunos metales nobles, como la plata y el oro, empleados en aplicaciones de electrónica y otros como el platino, utilizados en la manufactura de catalizadores para la industria química y petroquímica. Sin embargo, la mayor parte de los usos de metales no ferrosos a escala industrial es bajo la forma de diferentes aleaciones.

La variedad de combinaciones que se pueden realizar permiten cubrir las prestaciones mecánicas y físicas las propiedades químicas necesarias para fabricar una gran variedad artículos útiles para la industria y la sociedad. Algunas de las características distintivas de las aleaciones no ferrosas son la adecuada resistencia a distintos tipos de esfuerzos mecánicos, el buen comportamiento frente a la corrosión, la elevada conductividad eléctrica y maquinabilidad.

Es la eliminación de impurezas de metales en bruto. Después de la extracción de materias primas, metales en bruto son entre 96 y 99 por ciento de pureza del principal metal, siendo el resto impurezas. Metales en bruto no puede ser utilizado por la industria en esta etapa debido a la característica inferior en propiedades físicas, químicas, y propiedades mecánicas. Las impurezas que se encuentran en metales en bruto pueden tener un valor elevado en sí mismos, el oro y la plata recuperable de cobre, por ejemplo, pagar el costo total del proceso de refinación.

Los tres métodos básicos de refinación son pirometalúrgico, electrolítico y químico. Todos estos métodos se basan en las propiedades distintivas de los elementos individuales, como la temperatura de fusión, la densidad, y la electronegatividad. Los metales puros se obtienen frecuentemente mediante el empleo de varios métodos de refinación en sucesión



Fig. 1. Refinación de metales.

➤ Separación

Después de que los minerales han sido liberados de la ganga, la mena se somete a algún proceso de concentración que separa los minerales en dos o más productos. La separación por lo general se logra utilizando alguna diferencia específica en las propiedades físicas o químicas entre el mineral valioso y los minerales de la ganga en la mena.

El procesamiento de minerales está relacionado principalmente con los métodos físicos de separación los cuales pueden ser:

1. Separación que depende de las propiedades ópticas, radiactivas, etc. frecuentemente se llama clasificación, incluía hasta hace poco la selección manual de las menas de alto grado.

2. Separación que depende de las diferenciadas en la gravedad específica. Utiliza el movimiento diferencial de los minerales debido a los efectos de masa, por lo general en corrientes hidráulicas, tiene la ventaja de producir poca contaminación ambiental, por ejemplo, el hidrociclón, la elutriación y la mesa Winfield.

TÉCNICAS DE PREPARACIÓN DE MINERALES



Fig. 2. Separación Mecánica de Minerales.

✓ Flotación

La flotación en espuma, utiliza las diferentes propiedades superficiales de los minerales e indudablemente es el método de concentración más importante. Ajustando las propiedades químicas de las partículas de la pulpa proveniente del proceso de molienda mediante varios reactivos químicos, es posible que los minerales valiosos desarrollen avidez por el aire (aerofílicos) y que los minerales de la ganga busquen el agua y rechacen el aire (aerofóbicos). SEPARACIÓN MAGNÉTICA:

Separación que depende de las propiedades magnéticas. Los separadores magnéticos de baja intensidad se usan para concentrar minerales ferro-magnéticos tales como la magnetita (Fe_3O_4) mientras que los separadores magnéticos de alta intensidad se usan para separar minerales paramagnéticos de su ganga.

La separación magnética es un proceso importante en el beneficio de las menas de hierro, pero también encuentra aplicación en el tratamiento de minerales no ferrosos. Se usa ampliamente para extraer wolframita (FeWO_4) y hematita (Fe_2O_3) paramagnéticas de menas de estaño y encuentra considerable aplicación en el procesamiento de minerales no metálicos tales como los que se encuentran en depósitos de arena en las playas.



Fig. 3. Flotación de Minerales.

✓ Cribado o Tamizado

Fundamentalmente este proceso consiste en seleccionar y clasificar los minerales por medir el índice de finura obtenida durante la molienda, esta operación separa por diferencia de tamaño los materiales útiles de las gangas para esta operación es necesario utilizar telas o laminas perforadas conocidas como tamices, cribas. Los tamices para su manejo generalmente se clasifican por el número de mallas o agujeros que existen en una distancia de pulgada lineal.

Este proceso consiste en utilizar un agujero, un juego de tamices colocados verticalmente en orden creciente de superior a inferior, dichos conjuntos pueden estar accionados por dispositivos que produzcan sacudidas, vibraciones, oscilaciones, trepidaciones. Durante el tamizado los granos más gruesos son detenidos en los tamices colocados en la parte superior.

La separación del compuesto metálico de la ganga se efectuará sobre el mineral molido, la operación suministra un producto enriquecido en mineral. La separación se basa en diferencias de propiedades físicas de la ganga y de la combinación metálica, por eje la diferencia de densidad en la concentración Hidromecánica. En la concentración por flotación se utilizan las fuerzas de tensión superficial, y las fuerzas magnéticas en la concentración magnética.



Fig. 4. Cribado y tamizado de Minerales.

✓ **Concentración Hidromecánica**

El compuesto metálico y la ganga se separan por orden de densidad es en un líquido inmóvil o en movimiento.

a) Separador de émbolo: se compone de una cuba llena de agua, un émbolo P comunica a la masa de agua un movimiento de pulsación. Los finos mezclados con el agua llegan a través de la rejilla G, las partículas ligeras son elevadas por el líquido en movimiento hasta una altura inversamente proporcional a sus pesos y escapan por el desagüe D, las partículas pesadas caen al fondo y se pueden extraer mediante una cadena de cangilones.

b) Separador por Arrastre: el aparato está formado por una serie de cajas tronco piramidales C1 C2 etc., cuya longitud y profundidad aumentan gradualmente desde la entrada a la salida. Los finos son arrastrados por una corriente de agua cuya velocidad disminuye al aumentar el tamaño de las cajas: Las partículas más pesadas se depositan en las primeras cajas. Para asegurar una clasificación más completa de las partículas se inyecta una corriente de aire o agua por los tubos T1 T2 que vuelve a suspenderlas. Los productos clasificados se recogen por los orificios O1 O2 etc.

c) Separados por flotación: si se depositan suavemente los finos sobre la superficie de un líquido apropiado se comprueba que la ganga se hunde y que el compuesto metálico no se moja y flotará debido a la tensión superficial. Hay minerales que no son mojados por el agua y se consigue separarlos con agua sola o, con agua preparada especialmente con aceite (sulfuros). En el caso que se emplee agua con aceite, el aceite reviste a las partículas de sulfuro que por este motivo no son mojados por el agua y flotan en la superficie, los granos de la ganga mojables por el agua caen al fondo.

d) Separación Magnética: Un separador magnético es el representado en la fig., está constituido por un tambor T formadas por láminas alternadas de hierro y cobre. El Campo magnético creado por el electroimán E imanta las láminas de hierro dulce. Los bloques magnéticos A (hematites rojas o pardas, carbonatos de hierro, etc.) son retenidos por las láminas imantadas, los estériles caen directamente en B y el mineral magnético en A.



Fig. 5. Concentración Hidromecánica de Minerales.

➤ Destilación

La destilación es el proceso de separar las distintas sustancias que componen una mezcla líquida mediante vaporización y condensación selectivas. Dichas sustancias, que pueden ser componentes líquidos, sólidos disueltos en líquidos o gases licuados, se separan aprovechando los diferentes puntos de ebullición de cada una de ellas, ya que el punto de ebullición es una propiedad intensiva de cada sustancia, es decir, no varía en función de la masa o el volumen, aunque sí en función de la presión.

La destilación simple o destilación sencilla es una operación donde los vapores producidos son inmediatamente canalizados hacia un condensador, el cual los enfría (condensación) de modo que el destilado no resulta puro. Su composición será diferente a la composición de los vapores a la presión y temperatura del separador y pueden ser calculadas por la ley de Raoult.

En esta operación se pueden separar sustancias con una diferencia entre 100 y 200 grados Celsius, ya que si esta diferencia es menor, se corre el riesgo de crear azeótropos. Al momento de efectuar una destilación simple se debe recordar colocar la entrada de agua por la parte de arriba del refrigerante para que de esta manera se llene por completo. También se utiliza para separar un sólido disuelto en un líquido o 2 líquidos que tengan una diferencia mayor de 50 °C en el punto de ebullición.

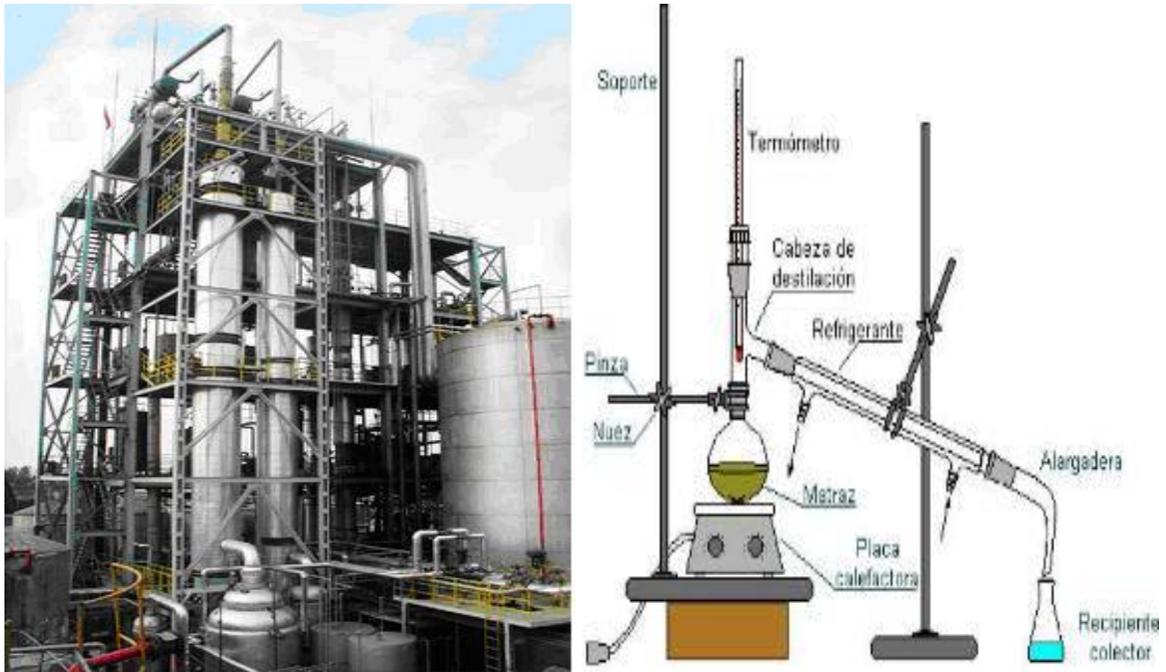


Fig. 6. Destilación simple o destilación sencilla.

La destilación fraccionada de alcohol etílico es una variante de la destilación simple que se emplea principalmente cuando es necesario separar líquidos con puntos de ebullición cercanos.

La principal diferencia que tiene con la destilación simple es el uso de una columna de fraccionamiento. Esta permite un mayor contacto entre los vapores que ascienden, junto con el líquido condensado que desciende, por la utilización de diferentes "platos". Esto facilita el intercambio de calor entre los vapores (que lo ceden) y los líquidos (que lo reciben).

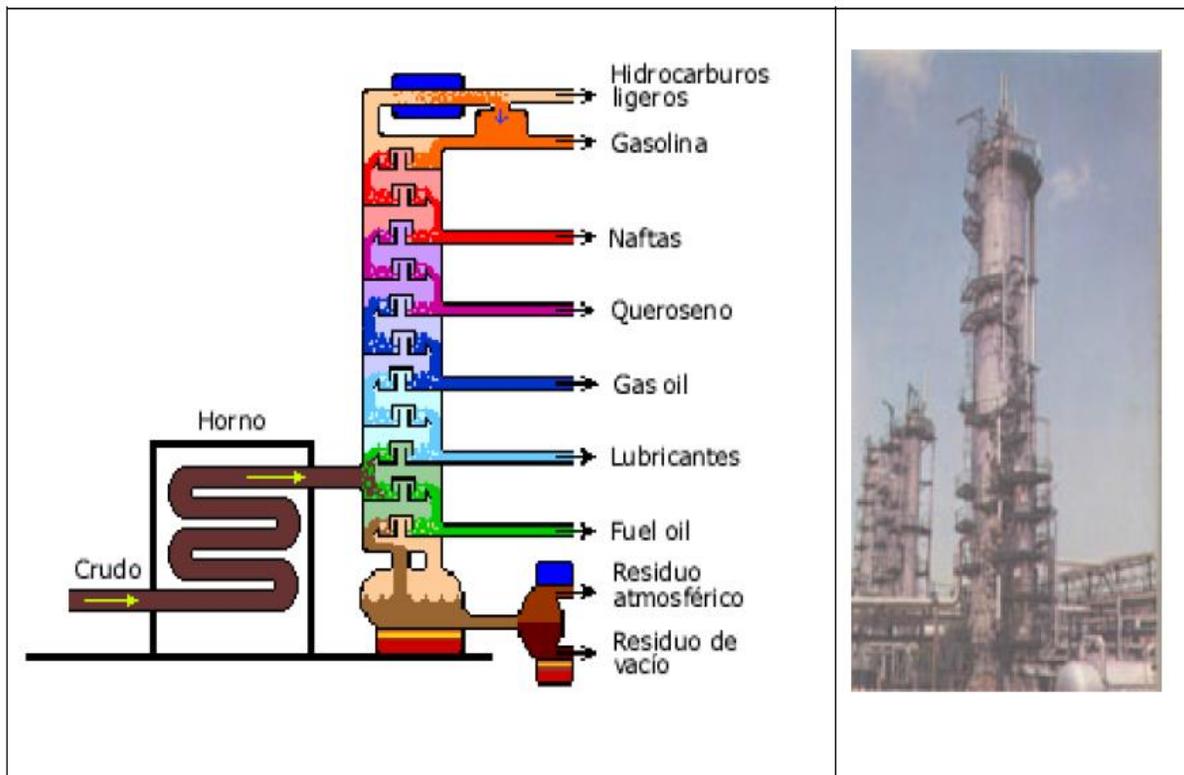


Fig. 7. Destilación fraccionada.

La destilación al vacío consiste en generar un vacío parcial por dentro del sistema de destilación para destilar sustancias por debajo de su punto de ebullición normal. Este tipo de destilación se utiliza para purificar sustancias inestables como son por ejemplo las vitaminas. Lo importante en esta destilación es que al crear un vacío en el sistema se puede reducir el punto de ebullición de la sustancia casi a la mitad.

En el caso de la industria del petróleo es la operación complementaria de destilación del crudo procesado en la unidad de destilación atmosférica, que no se vaporiza y sale por la parte inferior de la columna de destilación atmosférica. El vaporizado de todo el crudo a la presión atmosférica necesitaría elevar la temperatura por encima del umbral de descomposición química y eso, en esta fase del refinado de petróleo, es indeseable.

El residuo atmosférico o crudo reducido procedente del fondo de la columna de destilación atmosférica, se bombea a la unidad de destilación a vacío, se calienta generalmente en un horno a una temperatura inferior a los 400 °C, similar a la temperatura que se alcanza en la fase de destilación atmosférica, y se introduce en la columna de destilación. Esta columna trabaja a vacío, con una presión absoluta de unos 20 mm de Hg, por lo que se vuelve a producir una vaporización de productos por efecto de la disminución de la presión, pudiendo extraerle más productos ligeros sin descomponer su estructura molecular.

El producto del fondo, residuo de vacío, se utiliza principalmente para alimentar a unidades de craqueo térmico, donde se vuelven a producir más productos ligeros y el fondo se dedica a producir fuel oil, o para alimentar a la unidad de producción de coque. Dependiendo de la naturaleza del crudo el residuo de vacío puede ser materia prima para producir asfaltos

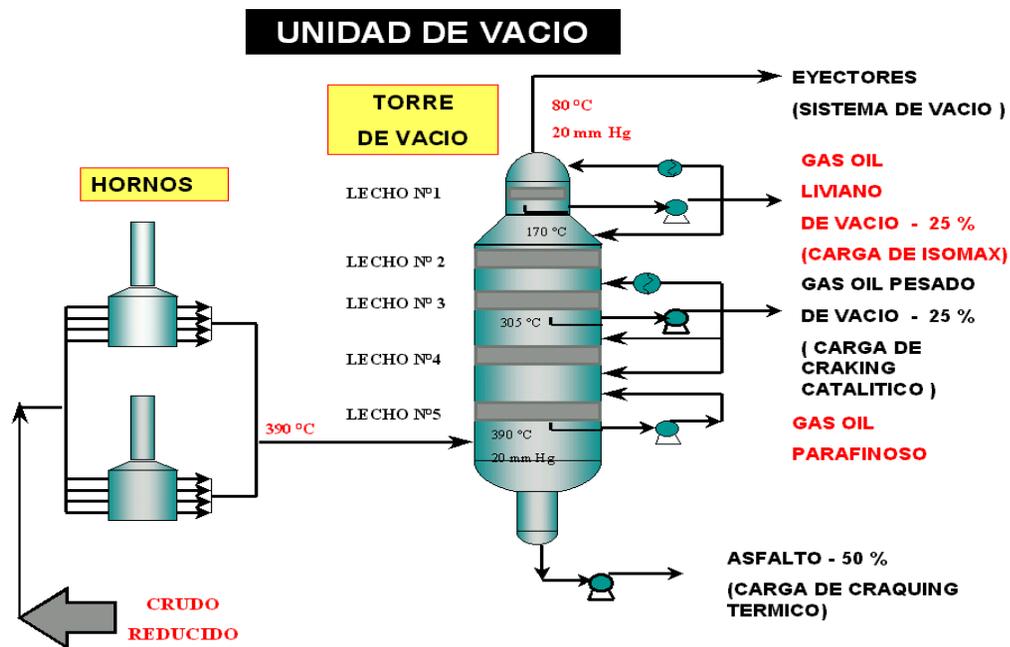


Fig. 8. Destilación al vacío.

La destilación azeotrópica es una de las técnicas usadas para romper un azeótropo en la destilación. Una de las destilaciones más comunes con un azeótropo es la de la mezcla etanol-agua. Usando técnicas normales de destilación, el etanol solo puede purificarse a aproximadamente el 95 %.

Una vez se encuentra en una concentración de 95/5 % etanol/agua, los coeficientes de actividad del agua y del etanol son iguales, entonces la concentración del vapor de la mezcla también es de 95/5 % etanol-agua, por lo tanto destilar de nuevo no es efectivo. Algunos usos requieren concentraciones de alcohol mayores, por ejemplo cuando se usa como aditivo para la gasolina. Por lo tanto el azeótropo 95/5 % debe romperse para lograr una mayor concentración.

En uno de los métodos se adiciona un material agente de separación. Por ejemplo, la adición de benceno a la mezcla cambia la interacción molecular y elimina el azeótropo. La desventaja, es la necesidad de otra separación para retirar el benceno. Otro método, la variación de presión en la destilación, se basa en el hecho de que un azeótropo depende de la presión y también que no es un rango de concentraciones que no pueden ser destiladas, sino el punto en el que los coeficientes de actividad se cruzan. Si el azeótropo se salta, la destilación puede continuar.

En la destilación por arrastre de vapor de agua se lleva a cabo la vaporización selectiva del componente volátil de una mezcla formada por éste y otros "no volátiles". Lo anterior se logra por medio de la inyección de vapor de agua directamente en el interior de la mezcla, denominándose este "vapor de arrastre", pero en realidad su función no es la de "arrastrar" el componente volátil, sino condensarse en el matraz formando otra fase inmiscible que cederá su calor latente a la mezcla a destilar para lograr su evaporación. En este caso se tendrán la presencia de dos fases insolubles a lo largo de la destilación (orgánica y acuosa), por lo tanto, cada líquido se comportará como si el otro no estuviera presente. Es decir, cada uno de ellos ejercerá su propia presión de vapor y corresponderá a la de un líquido puro a una temperatura de referencia. La condición más importante para que este tipo de destilación pueda ser aplicado es que tanto el componente volátil como la impureza sean insolubles en agua ya que el producto destilado volátil formará dos capas al condensarse, lo cual permitirá la separación del producto y del agua fácilmente.



Fig. 9. Destilación azeotrópica.

La destilación mejorada es cuando existen dos o más compuestos en una mezcla que tienen puntos de ebullición relativamente cercanos, es decir, volatilidad relativa menor a 1 y que forma una mezcla no ideal es necesario considerar otras alternativas más económicas a la destilación convencional, como son: destilación alterna y destilación reactiva, estas técnicas no son ventajosas en todos los casos y las reglas de análisis y diseño pueden no ser generalizables a todos los sistemas, por lo que cada mezcla debe ser analizada cuidadosamente para encontrar las mejores condiciones de trabajo.



Fig. 10. Destilación mejorada.

La destilación seca es la calefacción de materiales sólidos en seco (sin ayuda de líquidos solventes), para producir productos gaseosos (que pueden condensarse luego en líquidos o sólidos).

El método puede o puede no implicar termólisis, donde los productos así obtenidos, son condensados y recolectados posteriormente. Este método, por lo general, requiere temperaturas más altas que la destilación clásica. Este procedimiento ha sido usado para obtener combustibles líquidos de sustancias sólidas, tales como carbón y madera.

Esto también puede ser usado para dividir algunas sales minerales por termólisis, tales como algunos sulfatos para, en este caso, producir trióxido de azufre que puede ser disuelto en agua, para así obtener ácido sulfúrico. Por este método el ácido sulfúrico fue primariamente identificado y artificialmente agregado.

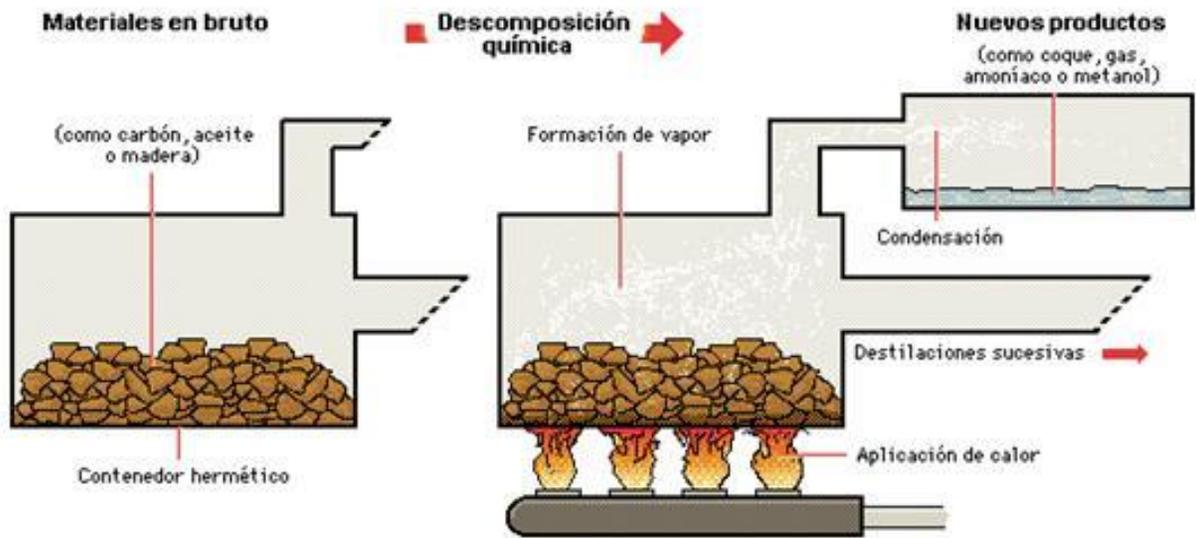


Fig. 11. Destilación seca.

➤ Fundamento Teórico

Proceso que consiste en calentar un líquido hasta que sus componentes más volátiles pasan a la fase de vapor y, a continuación, enfriar el vapor para recuperar dichos componentes en forma líquida por medio de la condensación. El objetivo principal de la destilación es separar una mezcla de varios componentes aprovechando sus distintas volatilidades, o bien separar los materiales volátiles de los no volátiles.

En la evaporación y en el secado, normalmente el objetivo es obtener el componente menos volátil; el componente más volátil, casi siempre agua, se desecha. Sin embargo, la finalidad principal de la destilación es obtener el componente más volátil en forma pura. Por ejemplo, la eliminación del agua de la glicerina evaporando el agua, se llama evaporación, pero la eliminación del agua del alcohol evaporando el alcohol se llama destilación, aunque se usan mecanismos similares en ambos casos.

La destilación es una operación utilizada con frecuencia para la purificación y aislamiento de líquidos orgánicos. La destilación aprovecha las volatilidades y puntos de ebullición de los componentes líquidos a separar. La destilación depende de parámetros como: El equilibrio líquido vapor, temperatura, presión, composición, energía.

- ✓ El equilibrio entre el vapor y el líquido de un compuesto está representado por la relación de moles de vapor y líquido a una temperatura determinada, también puede estudiarse este equilibrio a partir de sus presiones de vapor.
- ✓ La temperatura influye en las presiones de vapor y en consecuencia de la cantidad de energía proporcionada al sistema, también influye en la composición del vapor y el líquido ya que esta depende de las presiones del vapor.
- ✓ La presión tiene directa influencia en los puntos de ebullición de los líquidos orgánicos y por tanto en la destilación.
- ✓ La composición es una consecuencia de la variación de las presiones de vapor, de la temperatura que fijan las composiciones en el equilibrio.
- ✓ Puntos de ebullición, son aquellos puntos o temperaturas de compuestos puros a las que sus presiones de vapor igualan a la presión atmosférica, el fenómeno llamado ebullición. (MOLINA, 1991)

➤ **Clasificación de la destilación**

- ✓ Destilación simple o sencilla.
- ✓ Destilación Fraccionada.
- ✓ Destilación por Arrastre de vapor.
- ✓ Destilación a presión reducida o al vacío.



Fig. 12. Mapa Conceptual de la destilación.

➤ Refinación

Los metales que se obtienen de los procesos primarios de extracción contienen frecuentemente impurezas provenientes de la mena, los fundentes o el combustible. Para poder utilizar dichos metales es necesario someterlos a uno o varios procesos de refinación. La refinación tiene como fin producir el metal tan puro como sea posible, o en algunos casos, por ejemplo, en la fabricación de acero la refinación se hace para producir un producto con cantidades controladas de impurezas.

Finalmente, algunos procesos de refinación se realizan para recuperar impurezas que no son perjudiciales, sino que tienen un alto valor por sí mismas, como por ejemplo, la recuperación de plata en menas de plomo. Los procesos de refinación se basan siempre en el principio de que diferentes elementos se distribuyen de manera distinta entre distintas fases y que estas fases pueden separarse por métodos físicos. Es importante mencionar que los procesos de refinación de metales no son otra cosa más que procesos de separación de mezclas.

Existen muchos procesos de refinación, los cuales involucran conceptos fisicoquímicos muy complejos. De manera general, los procesos se pueden dividir en dos grupos principales:

1. Metal-escoria: aquí el proceso importante es la oxidación y eliminación en la escoria de los elementos menos nobles y puede dársele el nombre común de pirorefinación, ejemplos de éste proceso son la fabricación de acero y la pirorefinación de cobre y plomo.
2. Metal-metal: en éste proceso se encuentra la licuación y la refinación por zonas la cual se utiliza en la elaboración de metales de la más alta pureza.



Fig. 13. Diagrama de los Procesos Metalúrgicos.

4.2. Procesos físicos y químicos de refinación de metales.

Cuando el mineral es extraído de la mina, contiene grandes cantidades de sustancias estériles (ganga), en la mayoría de los casos se debe someter a un tratamiento previo de separación (por trituración y molienda, gravimetría, flotación, separación magnética, etc.) Estas operaciones previas por lo general no producen alteraciones en la identidad del mineral.

La siguiente etapa son procesos químicos que se efectúan a altas temperaturas o bien se utilizan soluciones acuosas o corriente eléctrica, esto con la finalidad de eliminar la mayor cantidad de impurezas (refinación). Después que los metales son refinados, se les somete a diferentes tratamientos físicos y químicos para obtener de ellos determinadas cualidades, adaptándolas a las aplicaciones que se les va a dar.

Concentración: es la operación que nos permite realizar una separación sólido-sólido, previa trituración o molienda. La separación consiste en obtener un producto valioso denominado concentrado y otro constituido por minerales estériles denominado relave. Posteriormente los procesos de metalurgia extractiva transformaran los concentrados en metales de alta pureza o productos de uso industrial.

Los minerales son sólidos naturales inorgánicos, pudiendo ser elementos, como en el caso del diamante (C) o compuestos químicos como en el caso de la halita (NaCl). En los minerales las partículas que los constituyen se disponen ordenadamente dentro de una estructura interna, característica que lo sitúa como solido cristalino, por lo que presentan tres propiedades fundamentales:

- Propiedades estructurales: debido a su estructura cristalina pueden presentar formas geométricas externas, como es el caso del cuarzo (SiO_2), que presenta la forma combinada de prisma hexagonal con bipirámide hexagonal.
- Propiedades físicas: Son muy variables y sirven para identificar al mineral. Por ejemplo, en el caso del oro nativo, podría confundirse con la pinta (FeS_2) por el color y brillo, pero se diferencian porque el primero es muy denso y variable.
- Propiedades químicas: generalmente dependen del grupo aniónico que caracteriza su composición química. Así, agregamos una gotas de HCl a una muestra de calcita (CaCO_3), esta efervescerá debido al desprendimiento de CO_2 durante la reacción, pero esto no ocurriría con el yeso, cuya composición es $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$.

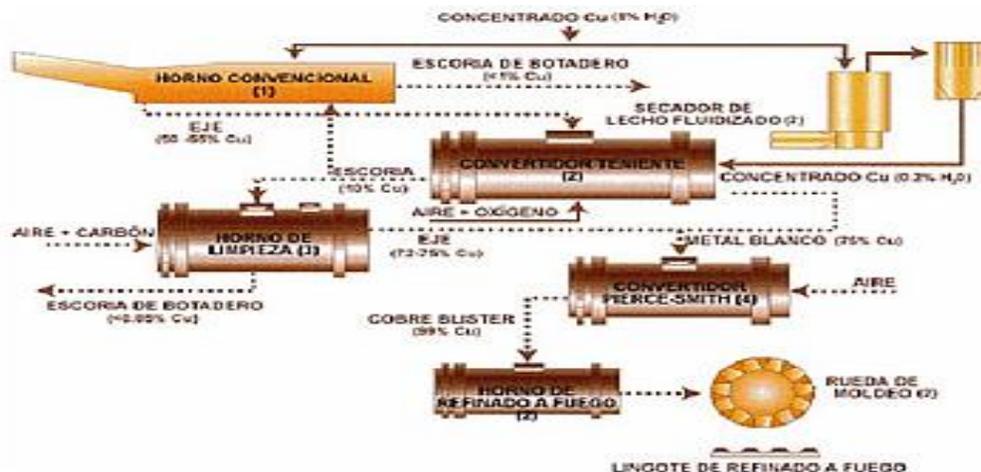


Fig. 14. Ejemplo de los procesos físicos y químicos de refinación de metales.

Los metales que consiguen obtener en pirometalurgia, a través de reductores químicos, o por electrólisis, cuentan con una cierta cantidad de otro tipo de elementos que los hacen ser impuros en diferentes grados. Dicho hecho puede afectar de manera negativa a sus propiedades y a sus aplicaciones. Es por este motivo que por lo general, se necesita hacer pasar al metal por un procedimiento de afinamiento o purificación, con el fin de eliminar la mayor parte posible de las impurezas que se encuentran acompañando el metal.

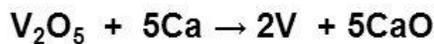
La refinación es la eliminación de impurezas de metales en bruto. Después de la extracción de materias primas, metales en bruto son entre 96 y 99 por ciento de pureza del principal metal, siendo el resto impurezas. Metales en bruto no pueden ser utilizados por la industria en esta etapa debido a la característica inferior en propiedades físicas, químicas, y propiedades mecánicas. Las impurezas que se encuentran en metales en bruto pueden tener un valor elevado en sí mismos, el oro y la plata recuperable de cobre, por ejemplo, pagar el costo total del proceso de refinación.

Los tres métodos básicos de refinación son pirometalúrgico, electrolítico y químico. Todos estos métodos se basan en las propiedades distintivas de los elementos individuales, como la temperatura de fusión, la densidad, y la electronegatividad. Los metales puros se obtienen frecuentemente mediante el empleo de varios métodos de refinación en sucesión.



Procesos:

a) Reducción Química: Se emplea como agente reductor un metal más electropositivo que otro para separar al metal de interés a partir de la mena a altas temperaturas.



En algunos casos el hidrógeno se emplea como agente reductor

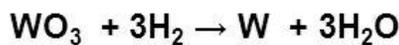


Fig. 15. Ejemplo de la reducción química de ciertos metales.

✓ Refinación pirometalúrgica

La refinación pirometalúrgica, que se lleva a cabo a una alta temperatura en una masa fundida, tiene un número de variaciones. Refinación de oxidación se basa en la tendencia de algunas impurezas para formar compuestos con O, S, Cl, F y que son más estables que los compuestos de la principal metal y estos elementos.

Esta técnica se utiliza para refinar Cu, Pb, Zn y Sn. Por ejemplo, cuando una corriente de aire es forzado a través del cobre fundido, los óxidos se forman mezclas de Fe, Ni, Zn, Pb, Sb, As, y Sn, ya que las mezclas tienen una mayor tendencia a reaccionar con el oxígeno que el cobre; los óxidos de subir a la superficie del tanque y se retiran.

○ Fusión y separación por densidad (Licuefacción)

Separación se basa en las diferencias en las temperaturas de fusión y densidades de componentes de la aleación y en el bajo nivel de solubilidad mutua de los componentes.

Por ejemplo, cuando el plomo crudo fundido se enfría, los cristales de cobre (escoria) separar a cabo a temperaturas establecidas y, debido a su baja densidad, flotan en la superficie y se puede quitar. Este método se utiliza para eliminar Cu, Ag, Au, Bi y de plomo crudo, para eliminar el Fe, Cu, Pb y de Zinc en bruto, y para refinar estaño y otros metales.

○ Recristalización fraccionada

Utiliza la diferencia en las solubilidades de un aditivo metálico en las fases sólida y líquida y la lenta difusión de impurezas en la fase sólida. Este método se utiliza en la producción de materiales semiconductores y en la preparación de los metales de alta pureza, sino que se emplea en la zona de fusión, la metalurgia del plasma, la eliminación de los cristales individuales a partir de una masa fundida, y la dirigida cristalización.

○ Purificación por zonas

Este método, también llamado afino por zonas, se usa para obtener metales con alto grado de pureza, como puede ser el caso del silicio que se usa en la fabricación de semiconductores. Se realiza un sistema de calefacción eléctrica a través de inducción que se encuentre rodeado por una barra de metal en bruto.

Cuando el sistema se desplaza a lo largo de la barra, el metal en sí se funde, disolviéndose en él la gran parte de las impurezas. La zona que se funde, es más soluble en el fundido que un metal sólido, va pasando y arrastrándolas a lo largo de toda la barra. Cuando la zona que está fundida llega al final de la barra, se condensa al enfriarse, y se corta. La repetición del procedimiento repetidas veces llevará a alcanzar un metal con una pureza superior del 99.99%.

○ Afino por oxidación

Éste es el proceso que ya se ha descrito para la purificación del hierro en estado bruto, así como la fabricación del acero. Por lo general, una vez se ha fundido el metal bruto, pueden pasar a eliminarse sus impurezas a través de la reacción con el oxígeno; formándose óxidos desprendido en forma de gas, u óxidos que reaccionan con algunos productos presentes y que se suelen separar como escoria. En el caso del acero, las impurezas que contienen de carbono, silicio, manganeso y azufre, disminuyen de manera controlada hasta llegar a los valores que se desean para cada tipo de acero.

○ Afino por destilación

Algunos de los procedimientos de purificación más usados son: a través de destilación, por zonas, electrolítico, mediante oxidación y por fusión. Los metales que poseen puntos de ebullición más bien bajos, como puede ser el caso del mercurio o el cinc, se pueden conseguir separar de otros metales que los hacen impuros, a través de la destilación fraccionada.

Para realizar esta técnica de destilación, debe haber una suficiente diferencia entre los diferentes puntos de ebullición de los metales, es decir, del metal que nos interesa purificar y de los metales que lo acompañan. De esta manera, puede conseguirse uno de los metales a modo de vapor, mientras que los demás se mantienen en estado líquido. Así por ejemplo, el cinc, que tiene un punto de ebullición de 906°C , puede ser separado de sus impurezas de plomo o cadmio, a través de destilación fraccionada, pues los puntos de ebullición de los otros dos metales son respectivamente, 1725°C y 765°C .

Se basa en la diferencia entre el punto de ebullición del metal principal y la de las impurezas. Refinación se lleva a cabo como un proceso continuo en el que el reflujo se repiten volatilización y condensación de la fracción que se separa muchas veces. Rectificación se puede acelerar considerablemente si se realiza en un vacío. Este método tiene aplicación en la eliminación de Cd de Zn o Zn de Pb, en la separación de Al y Mg, Ti y en la metalurgia. La filtración a vacío de un metal líquido a través de filtros de cerámica elimina las impurezas sólidas suspendidas; el proceso se utiliza en metalurgia Sn.

Cuando el acero es refinado en una cuchara de colada con escoria sintética líquida, la superficie de contacto del metal y la escoria es apreciablemente mayor (debido a la mezcla), que cuando los procesos de refinación se lleva a cabo en un agregado de fusión. Esto mejora enormemente la eficiencia de desulfuración, defosforación, y desoxidación de metales en la eliminación de impurezas no metálicas. Los gases inertes son soplados a través de acero fundido en un procedimiento de refinado que elimina suspendidas partículas de escoria u óxidos sólidos del metal. Las impurezas se adhieren a las burbujas de gas y flotan en la superficie de la masa fundida.

Procesos metalúrgicos

a) Se prepara la mena
b) Se obtiene el metal
c) Se afina el metal

a) En el tratamiento de una mena, puede separarse el mineral deseado de la ganga (generalmente arcillas y minerales de silicato) mediante

- * flotación: la mena se muele y se vierte en una mezcla de agua con aceite y detergente, y se bate para formar espuma. La ganga se deposita en el fondo, mientras que el aceite moja el mineral de interés que se mezcla con la espuma. La espuma se recoge y se seca, separando el mineral.
- * Si son minerales ferro magnéticos (Fe, Ni) pueden separarse con electroimanes.
- * Muchos metales forman amalgamas con mercurio, y luego se separa el Hg por destilación
- * Por tostación, se eliminan impurezas volátiles y se convierten carbonatos y sulfuros en óxidos metálicos más fáciles de reducir.

Fig. 16. Procedimientos de procesos metalúrgicos.

✓ Refinado electrolítico

Ciertos metales, como el cobre, la plata o el oro, a través de electrólisis se purifican. Por ejemplo, el cobre que se consigue por tostación partiendo del sulfuro de cobre, suele tener un contenido de impurezas en pequeñas cantidades de otros metales. Por electrólisis de cobre bruto, el cual hace el papel de ánodo, se recoge en el cátodo el cobre con una alta pureza, lo que es crucial para su posterior utilización como conductor eléctrico.

La electrólisis puede ser utilizado para separar los metales debido a que el principal metal y mezclas de los tienen diferentes potenciales electroquímicos. Por ejemplo, el potencial de electrodo estándar relativa de Cu a un electrodo normal de hidrógeno-toma como cero-es + 0,346; los valores de Au y Ag son mayores, y las de Ni, Fe, Zn, Mn, Pb, Sn y Co son negativos.

Durante la electrólisis, el cobre se deposita en el cátodo, los metales nobles no se disuelven sino que se depositan en el fondo de la celda electrolítica como una suspensión, y metales con potenciales de electrodo negativas se acumulan en el electrolito, que se limpia periódicamente.

Ocasionalmente-en la hidrometalurgia del zinc, por ejemplo-refinación electrolítica se realiza utilizando ánodos insolubles. Aquí, el metal principal es en una solución de la que las impurezas se retiran cuidadosamente de antemano, y durante la electrólisis se deposita en el cátodo como una masa compacta.

Mediante la electrorefinación se transforman los ánodos producidos en el proceso de fundición a cátodos de cobre electrolítico de alta pureza. El proceso de electro refinación constituye la etapa terminal del proceso de beneficio de minerales sulfurados y mixtos de cobre, que contempla las siguientes operaciones unitarias:

- Chancado
- Molienda
- Flotación
- Conversión
- Fusión
- Electrorefinación

Refinación electrolítica, la electrólisis de soluciones acuosas o sal se funde, produce metales de alta pureza. Se utiliza para la purificación completa de la mayoría de los metales no ferrosos. Refinación electrolítica con ánodos solubles implica la disolución del ánodo de los metales a ser purificada y la deposición de los metales puros en el cátodo, en este proceso, los electrones del circuito externo son capturados por iones del metal principal.

Ejemplo de la electrorefinación del cobre

La electrorefinación es un proceso que se lleva a cabo en las celdas electrolíticas en donde se ponen alternadamente un ánodo de cobre blister y un cátodo inicial de cobre puro en una solución de ácido sulfúrico. A esta instalación se le aplica una corriente eléctrica continua de baja intensidad, que hace que se disuelva el cobre del ánodo y se deposite en el cátodo inicial, lográndose cátodos de 99,99% de cobre y un peso entre 150 y 165 kg.

La electrorefinación tiene dos objetivos:

- a) Eliminar las impurezas que dañan las propiedades eléctricas y mecánicas del cobre.
- b) Separar las impurezas valiosas del cobre, estas pueden ser recuperadas después como subproductos metálicos.

La electrólisis consiste en hacer pasar una corriente eléctrica por una solución de ácido sulfúrico y agua. Durante la electrólisis se oxida el ánodo, y los iones de cobre (Cu^{2+}) se dirigen al cátodo, donde se depositan como cobre metálico. Los componentes del ánodo que no se disuelven, se depositan en el fondo de las celdas electrolíticas, formando lo que se conoce como barro anódico el cual es bombeado y almacenado para extraerle su contenido metálico y tiene las siguientes características:

- a) Utilización de solución ácida de CuSO_4 como electrolito, ánodos de cobre (99,7% de pureza) y láminas de arranque como cátodos (99,99% de pureza) como promedio.
- b) El proceso facilita la separación del cobre de otras impurezas en el ánodo, siendo adecuada para la producción industrial del cobre de alta pureza.
- c) Los metales preciosos como Au, Ag, Pt, etc. contenidos en los ánodos son separados como materiales insolubles, pudiendo ser recuperados ventajosamente del fango electrolítico.
- d) Amplio rango de condiciones de operación: temperatura, densidad de corriente, etc.
- e) Desde el punto de vista en que la electrodeposición es excelente y uniforme, la construcción de un tanque y el método de circulación son simples y adecuados para una buena producción a bajo costo en comparación con otros procesos.

- Comportamiento del Cobre durante la Electrolisis

1. Proceso Anódico:

En el ánodo el cobre por el paso de la corriente, se producen una reacción de oxidación disolviéndose el cobre en forma de ion cuproso y pasando éste a la solución, por tanto consumirá energía siendo la reacción la siguiente:



2. Proceso Catódico:

- a) Transporte del cation a través de la capa de la solución a la superficie del cátodo.
- b) Se produce una reacción de reducción del cation por medio de los electrones que pasan del cátodo formándose el metal con liberación de energía como se muestra en la reacción:



3. Como último paso es la introducción del átomo del metal formado dentro de la red cristalina del cátodo dando como resultado el crecimiento del cátodo.

- Sistemas de Afino Electrolítico

1. Sistema Múltiple:

Llamado también Sistema de Conexión en Paralelo, en el cual los ánodos y los cátodos se conectan en paralelo entre dos barras colectoras pesadas que están montadas en los lados de las cubas electrolíticas.

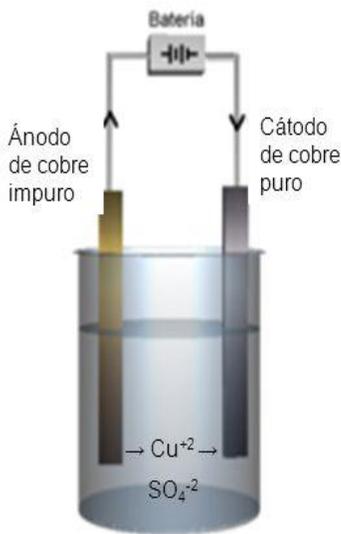
2. Sistema en Serie:

En este sistema los electrodos se colocan en posición vertical en el tanque y mientras un electrodo terminal se conecta al conductor positivo, el otro lo está al negativo.



b) Electrólisis:

Purificación electrolítica del cobre:



- ✓ Impurezas: Zn, Fe, Ag, Au
- ✓ Ánodo (oxidación) $\text{Cu (s)} \rightarrow \text{Cu}^{2+} (\text{ac}) + 2\text{e}^-$
- ✓ Cátodo (reducción) $\text{Cu}^{2+} (\text{ac}) + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Cu (s)}$
- ✓ Los metales reactivos en el ánodo de cobre (Fe, Zn) se oxidan y pasan a la disolución como Fe^{2+} y Zn^{2+} ; no se reducen en el cátodo.
- ✓ Los metales menos electropositivos (Au, Ag) se oxidan en el ánodo.
- ✓ A medida que se disuelve al ánodo estos metales caen al fondo de la celda.
- ✓ Pureza obtenida: $\uparrow 99.95\%$

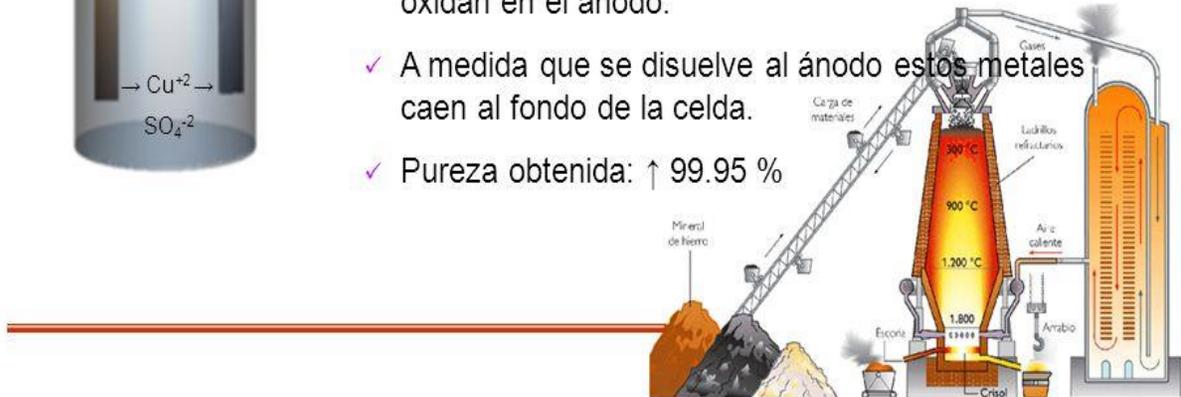


Fig. 17. Ejemplo de la electrorefinación del cobre.

✓ **Refinado químico.**

La refinación química se basa en las diferentes solubilidades de un metal y sus impurezas en soluciones ácidas o alcalinas. Las impurezas se acumulan gradualmente en una solución y se eliminan por medios químicos, tales como la hidrólisis, la cementación, la formación de compuestos escasamente solubles, y purificación por extracción o de intercambio iónico.

El refinado de metales nobles es un ejemplo de refinado químico. El oro (Au) se refina en ebullición sulfúrico o ácido nítrico; Cu, Ag, y otras impurezas metálicas se disuelven, mientras que el oro purificado, que es inmune al ataque con ácido, permanece como un residuo insoluble.

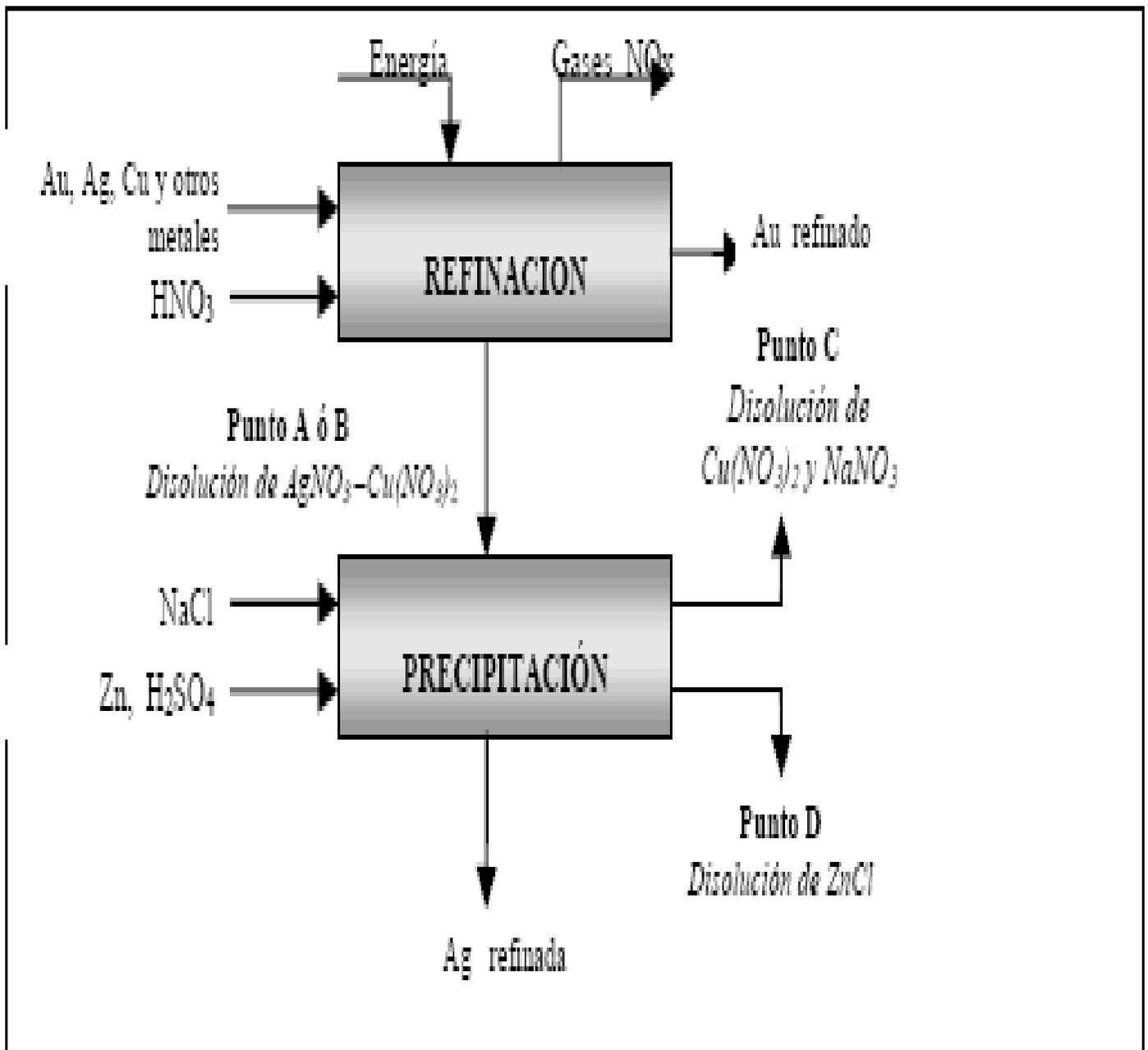


Fig. 18. Ejemplo del proceso de refinación química del oro y la plata.

4.3. Métodos de refinación por fusión de metales y aleaciones.

La mayoría de los metales, aun cuando pasan por un proceso de reducción para eliminar el oxígeno, no son lo suficientemente puros para uso comercial; deben ser refinados. Esto se ilustra con un aluminio en mineral que contiene algo de hierro, y puesto que el hierro se reduce más fácilmente que el aluminio, cualquier cantidad de hierro en el mineral aparecerá también en el metal.

De manera similar, una cierta porción del silicio o del fósforo en un mineral de hierro aparece en el hierro metálico que es extraído, debido a que estos elementos son reducidos en forma parcial junto con el hierro. Por regla general, estas impurezas son indeseables; por lo tanto deben ser eliminadas.

Nuevamente, para lograr lo anterior existe una gran variedad de procesos metalúrgicos disponibles. Describiremos solamente uno de ellos, el proceso de oxígeno básico, el cual es relativamente nuevo. Supongamos que tenemos hierro en estado fundido conteniendo 2%p de silicio y 3.5%p de carbono.

La composición dada es correcta si queremos usar el metal para ciertas fundiciones de hierro, pero debemos bajar los contenidos de silicio y carbono si va a ser usada en aceros de baja aleación. Invariablemente se usará oxígeno para separar selectivamente esas dos impurezas.

Debe anotarse, sin embargo, que no se podrá tener una simple reversión de la reducción inicial que antes describimos, puesto que el hierro se oxidaría junto con el silicio y el carbono. En términos sencillos, usamos una escoria rica en CaO debido a que posee una gran afinidad para el SiO₂ que se forma es desactivado por el CaO en la escoria.

La oxidación del carbono produce CO y CO₂ productos que salen del horno en forma de gases. Aunque algo de hierro puede oxidarse y disolverse en la escoria, esta pérdida puede minimizarse con un control adecuado de la temperatura y del tiempo.

El paso final en la producción de un metal es el solidificarlo en una lingotera, o moldearlo directamente en la forma deseada. Un lingote es simplemente una masa alargada y solidificada de metal que puede, subsecuentemente, ser deformada mecánicamente por laminado o forjado.

Una de las principales consideraciones técnicas al hacer una fundición es el hecho de que el volumen se reduce cuando el metal cambia de líquido a sólido. Con muy raras excepciones –por ejemplo el metal para "tipos", usados en las imprentas- la solidificación se ve acompañada de una contracción.

Por esta razón una reserva, usualmente llamada cabeza de alimentación, debe encontrarse dispuesta en la colada de manera que alimente material fundido adicional dentro del molde mientras que ésta se enfría (solidificación).

También se debe tener cuidado que los canales de alimentación no se solidifiquen y que obstruyan el flujo del metal fundido hacia las partes mayores que aún no se estén solidificando. El metalurgista puede compensar parcialmente este problema usando enfriadores, o amortiguadores de calor en las partes cercanas a las secciones más grandes de la fundición, incrementando así la velocidad de enfriamiento en esas zonas.

Un sistema de fundición, para obtener resultados satisfactorios, debe ser diseñado por una persona con considerable conocimiento técnico y una amplia experiencia.

- Afino por fusión

Al calentarse el metal justo por encima del punto de fusión, algunos metales como puede ser el caso del estaño, pueden llegar a purificarse, aunque el metal funde, no pasa lo mismo con sus impurezas, lo cual permite la fácil separación. El afino es el proceso de descarbonización y eliminación de impurezas al que se somete el arrabio (hierro de primera fundición con alto porcentaje de carbono) para la obtención del acero.

Este método de fusión se emplea para producir aceros de calidad superior partiendo de fundición, o bien acero si se trata de refinarlo. Se efectúa en hornos de crisol. Los más sencillos son los llamados de viento libre. El crisol es de grafito o de acero inoxidable (20% de níquel y 25% de cromo) y suele calentarse externamente, mediante carbón, gas o petróleo; o, más corrientemente, por inducción.

Los hornos de crisol calentados por inducción se emplean para fabricar aceros inoxidables refractarios, aceros magnéticos, etc. Íntimamente relacionado con el acero al crisol, se encuentra el acero al vacío. Se denomina así el acero resultante cuando, en algún momento del proceso, el líquido se encuentra rodeado por una disminución de la presión atmosférica. Esto facilita que se eliminen los gases ocluidos en el metal líquido, como son el óxido de carbono, el oxígeno, el hidrógeno, el plomo, etc.

- Afino al aire

Consiste en lanzar aire comprimido a través de la fundición en estado de fusión, con lo cual, oxidándose los cuerpos extraños que contiene, particularmente el carbono, aquélla se transforma en acero o hierro. Para que el afino se haga en buenas condiciones, es indispensable que la temperatura del baño sea siempre superior a la del punto de fusión del metal en los diversos grados de su transformación, el cual se eleva a medida que adelanta el proceso.

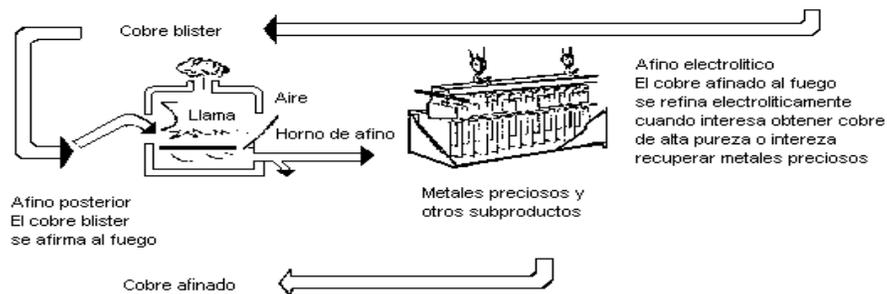
- Afino sobre solera

Consiste en descarbonar la fundición partiendo de chatarra de hierro y acero y mineral de hierro. Se utilizan los hornos Martin-Siemens, que se llaman así por deberse a estos dos metalúrgicos.

- Afino al horno eléctrico

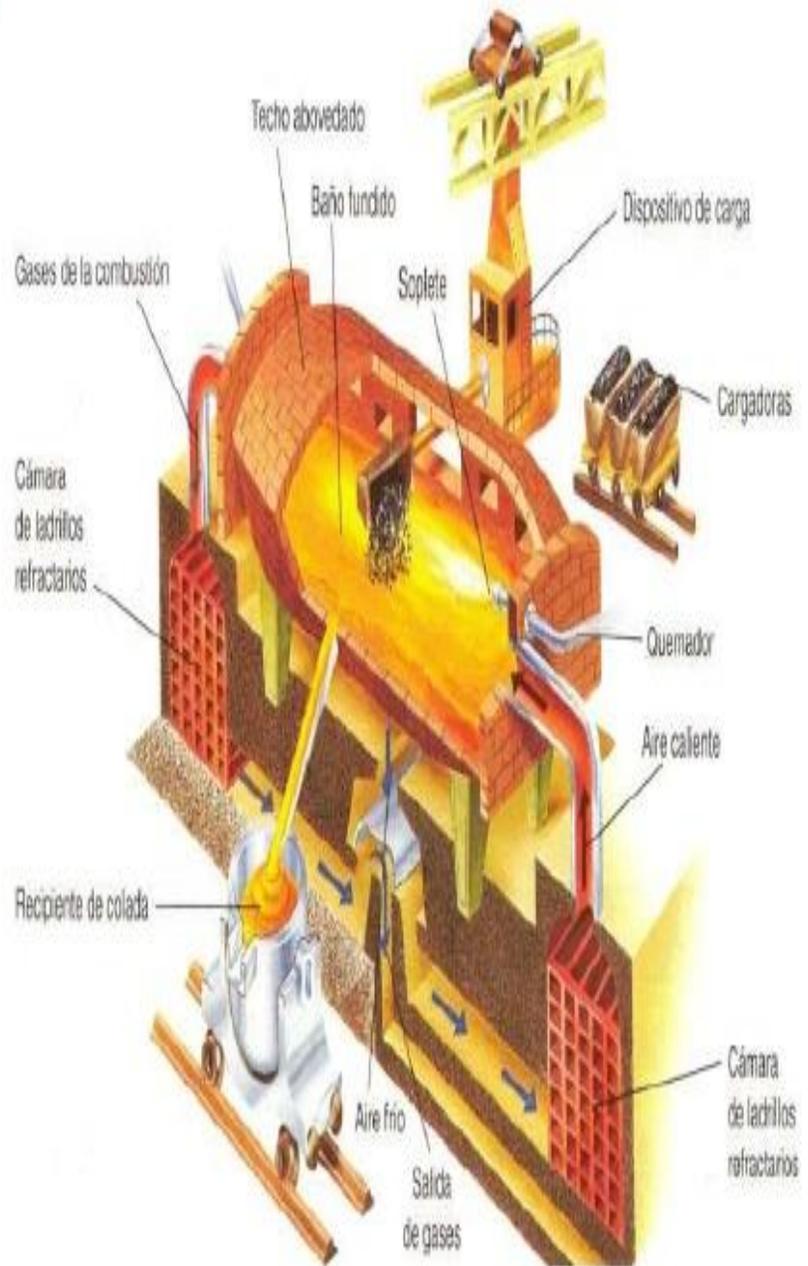
Este método tiene la ventaja de que el metal puede ser tratado sin intervenir el aire atmosférico, con lo cual se evita calentar inútilmente gases inertes, y siendo la fuerte concentración de calor favorable por disminuir las pérdidas por conducción y radiación; así se logran productos puros y de una calidad determinada previamente. La temperatura alcanzada puede ser mayor que en cualquiera de los hornos reseñados anteriormente. Además Se evita casi en su totalidad la reoxidación del acero.

AFINO



Proceso de Afino en horno Martin-Siemens o de hogar abierto:

- El horno es un recipiente rectangular con puertas para combustible y gases en ambos extremos.
- Estas puertas deben dirigir los gases hacia abajo, hacia la carga o baño del metal.
- La llama y los gases calientes pasan por encima del baño y salen por el extremo opuesto del horno.
- Los gases de la combustión atraviesan uno o dos regeneradores antes de perderse en la chimenea; frecuentemente se colocan calderas después de los regeneradores para recuperar el calor perdido y conseguir la mejor recuperación posible de los productos de la combustión mediante válvulas refrigeradas con agua y entonces al horno se le calienta desde el extremo opuesto.



Lluvia /raul

Fig. 19. Ejemplo de procesos de afino en un horno Martin Siemens de Hogar Abierto.