

(12) SOLICITUD INTERNACIONAL PUBLICADA EN VIRTUD DEL TRATADO DE COOPERACIÓN EN MATERIA DE PATENTES (PCT)

(19) Organización Mundial de la
Propiedad Intelectual
Oficina internacional



(43) Fecha de publicación internacional
20 de abril de 2017 (20.04.2017)

WIPO | PCT

(10) Número de Publicación Internacional
WO 2017/065622 AI

(51) Clasificación Internacional de Patentes:
C22B 5/02 (2006.01) C22B 15/00 (2006.01)

(21) Número de la solicitud internacional:
PCT/PE20 16/0000 14

(22) Fecha de presentación internacional:
15 de agosto de 2016 (15.08.2016)

(25) Idioma de presentación: español

(26) Idioma de publicación: español

(30) Datos relativos a la prioridad:
0021 85-2015/DIN
16 de octubre de 2015 (16. 10.2015) PE

(72) Inventor; e

(71) Solicitante : CÁRDENAS ARBIETO, Francisco Javier
[PE/PE]; Calle Amazonas N° 153, La Molina, Lima 12
(PE).

(74) Mandatario: MÉRCHOR VALDERRAMA, Bruno;
Calle Las Begonias N° 475, Piso 6, San Isidro, Lima 27
(PE).

(81) Estados designados (a menos que se indique otra cosa,
para toda clase de protección nacional admisible): AE,
AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN,

BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ,
DE, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE,
GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, JP, KE,
KG, KN, KP, KR, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA,
MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG,
NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS,
RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY,
TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN,
ZA, ZM, ZW.

(84) Estados designados (a menos que se indique otra cosa,
para toda clase de protección regional admisible):
ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW,
SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), euroasiática (AM, AZ,
BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), europea (AL, AT, BE, BG,
CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU,
IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT,
RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI,
CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

Publicada:

- con informe de búsqueda internacional (Art. 21(3))
- antes de la expiración del plazo para modificar las reivindicaciones y para ser republicada si se reciben modificaciones (Regla 48.2(h))

(54) Title: METHOD FOR EXTRACTING METALS FROM CONCENTRATED SULPHURATED MINERALS CONTAINING METALS BY DIRECT REDUCTION WITH REGENERATION AND RECYCLING OF THE REDUCING AGENT, IRON, AND OF THE FLUX, SODIUM CARBONATE

(54) Título : PROCESO PARA EXTRAER METALES A PARTIR DE LOS CONCENTRADOS DE MINERALES SULFURADOS QUE LOS CONTIENEN APLICANDO REDUCCIÓN DIRECTA CON REGENERACIÓN Y RECICLAJE DEL AGENTE REDUCTOR HIERRO Y DEL FUNDENTE CARBONATO DE SODIO

(57) Abstract: A method is disclosed for extracting metais from concentrated sulphurated minerals containing metais by direct reduction with regeneration and recycling of the reducing agent, iron, and of the flux, sodium carbonate. It is a combination of pyrometallurgical and hydrometallurgical processes which differ from the conventional processes. They do not require previous toasting of the concentrated sulphurated minerals and are technically and economically more advantageous than the presently used processes, since they directly reduce to zero the positive oxidation state of the metal, using a single reactor for extracting the metal, regenerating and recycling the metallurgical feed materials in complementary processes, the kinetics of the chemical reactions being characterised by high speed, without generating any slags or pollutant gases. The metais can be extracted at a reduced cost and in an environmentally sustainable manner.

(57) Resumen: Proceso para extraer metales a partir de los concentrados de minerales sulfurados que los contienen aplicando reducción directa con regeneración y reciclaje del agente reductor hierro y del fundente carbonato de sodio. Es una combinación de procesos pirometalúrgicos e hidrometalúrgicos distintos a los convencionales, que no requieren de una tostación previa del concentrado de minerales sulfurados y que resultan técnica y económicamente más ventajosos que los procesos actualmente utilizados, pues reduce a cero el estado de oxidación positivo del metal en forma directa, empleando un solo reactor para la extracción de metal, regenerando y reciclando los insumos metalúrgicos con procesos complementarios y con una alta velocidad en la cinética de las reacciones químicas, sin generar escorias ni gases contaminantes. Se consigue la extracción de metales con coste reducido y de manera ambientalmente sostenible.



WO 2017/065622 AI

**PROCESO PARA EXTRAER METALES A PARTIR DE LOS CONCENTRADOS DE
MINERALES SULFURADOS QUE LOS CONTIENEN APLICANDO REDUCCIÓN
DIRECTA CON REGENERACIÓN Y RECICLAJE DEL AGENTE REDUCTOR
HIERRO Y DEL FUNDENTE CARBONATO DE SODIO**

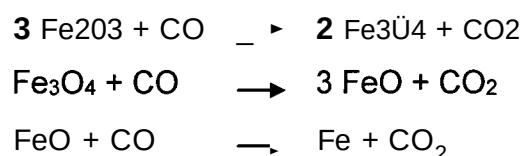
5

CAMPO TÉCNICO

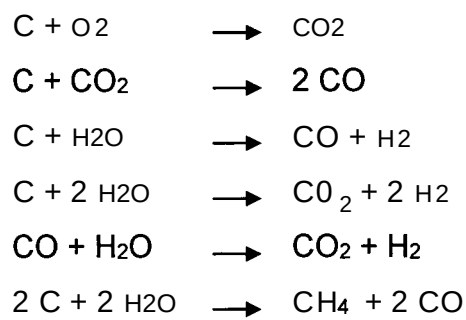
El campo técnico en el que corresponde aplicar el invento desarrollado es el de minería y metalurgia, por cuanto permite extraer metales ferrosos y no ferrosos a partir de los
10 minerales sulfurados que los contienen aplicando el proceso de reducción directa mejorado, esto es sin emisiones de anhídrido sulfuroso y sin producir las escorias que generan las plantas pirometalúrgicas convencionales, minimizando así la contaminación ambiental. Además, mediante la regeneración y reciclaje del agente reductor hierro y del fundente carbonato de sodio propuestos, se reducen
15 sustancialmente los costos operativos del proceso.

ESTADO DE LA TÉCNICA (O ANTECEDENTES DE LA INVENCION)

Según Aranguren F. & Mallol A.(1), desde tiempo atrás se conocen y aplican varios
20 procesos metalúrgicos de reducción en la extracción de metales, entre los que destaca por su importancia el de la reducción de minerales de óxido de hierro (hematita y magnetita principalmente) que permite, dependiendo de la técnica que se utilice, la obtención del arrabio o del hierro esponja, productos metalúrgicos a partir de los cuales se obtiene el acero, requiriéndose en estos casos como agentes reductores el carbón o
25 coque metalúrgico y/o el monóxido de carbono y/o el gas hidrógeno y/o gas natural, y como fundentes alcalinos la caliza o la dolomita, donde a la par de la ocurrencia del proceso principal, también ocurren en el mismo reactor la reducción de otros elementos tales como silicio, titanio, manganeso, cromo, vanadio, etcétera, siempre a partir de sus compuestos oxidados. Como reacciones químicas fundamentales consideradas en el
30 proceso de reducción aplicado a minerales oxidados de hierro se tienen establecidas las siguientes:

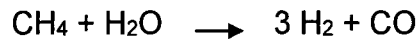


Así mismo, como indican Aranguren & Mallol (2), data de 1620 el año en que se construyó en Estados Unidos de Norteamérica el primer horno para procesar minerales de hierro. Después, durante varios siglos y hasta antes que aparecieran las plantas integrales que incluían tanto las de fabricación de arrabio como las de coque metalúrgico, en la industria siderúrgica era muy utilizado como combustible el gas de gasógeno, el cual cumplía una doble función, tanto de agente calórico como de agente reductor. El gas de gasógeno era producido mediante la gasificación total de un combustible sólido como hulla, antracita, lignito o el mismo coque, pudiéndose producir la gasificación con aire solo, con aire y vapor de agua o también con oxígeno y vapor de agua; siendo las reacciones fundamentales que se producen en un reactor gasógeno las siguientes:

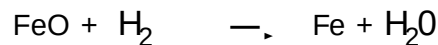
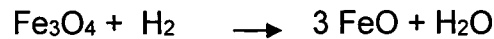
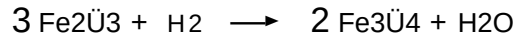


Perfeccionando el conocido proceso de reducción de minerales de hierro y utilizando como agente reductor el monóxido de carbono, en 1918 Wieber (3) propuso que los gases resultantes de la reducción de los minerales de hierro, principalmente dióxido de carbono más los remanentes del monóxido de carbono utilizado como agente reductor, fueran conducidos a otro reactor donde debe ocurrir la combustión del carbón, esto es con la finalidad de generar más monóxido de carbono a partir del mismo dióxido de carbono reciclado y del carbón, con lo cual se conseguía reducir el consumo de este último.

Dado que en el referido proceso mejorado es importante que el gas hidrógeno participe como agente reductor en una medida apreciable por su mayor poder calorífico, la presencia del gas hidrógeno en la composición porcentual de los gases reductores debe corresponder al rango entre 20% y 35%, lo cual se puede lograr si en forma complementaria se utiliza gas natural, cuya reacción con vapor de agua a altas temperaturas es:

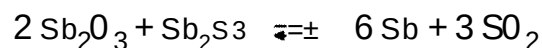
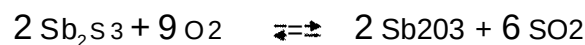
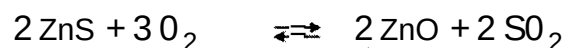
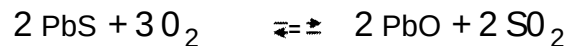


resultando factible reducir con gas hidrógeno los minerales de óxido de hierro mediante las siguientes reacciones fundamentales:



5

Por otro lado, las técnicas convencionales utilizadas actualmente en la extracción de metales comunes no ferrosos (plomo, cobre, zinc, antimonio, etcétera) a partir de sus minerales sulfurados consiste en tostar los mismos con el fin de obtener como productos los compuestos oxidados de los referidos metales para, seguidamente, aplicar procesos pirometalúrgicos con el objeto de extraer plomo, cobre, zinc, antimonio, etcétera; o alternativamente procesos hidro-electrometalúrgicos, como en el caso de la extracción del zinc, resultando fundamentales en la extracción pirometalúrgica de metales comunes no ferrosos las siguientes reacciones (4):



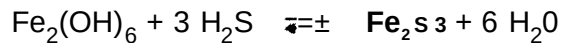
15

Entre las características de las plantas que se han implementado con estos últimos procesos se tienen las grandes emisiones de anhídrido sulfuroso que generan, lo que las ha obligado a instalar costosas plantas de fabricación de ácido sulfúrico para minimizar la contaminación ambiental, así como también las grandes cantidades de escorias que producen, las mismas que son acumuladas cerca de las plantas metalúrgicas, contaminando el medio ambiente de la zona de influencia.

20

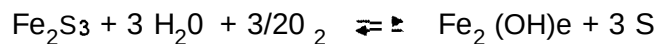
Del mismo modo, es igualmente conocido que el gas de hulla (subproducto de los hornos de coque siderúrgico) tiene al gas sulfhídrico como uno de sus componentes por depurar antes de su utilización, teniéndose como alternativa para lograr este objetivo el pasar el gas sulfhídrico por una masa de óxido de hierro hidratado a fin de

5 que ocurra la siguiente reacción (5):



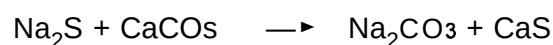
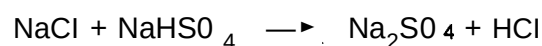
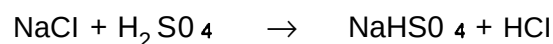
de forma tal que cuando la masa de óxido de hierro hidratado se encuentra saturada de azufre, se procede a airear los compuestos formados, consiguiéndose no sólo azufre elemental (S), sino también la regeneración del óxido de hierro hidratado debido a la

10 siguiente reacción originada por la presencia del oxígeno y del agua:



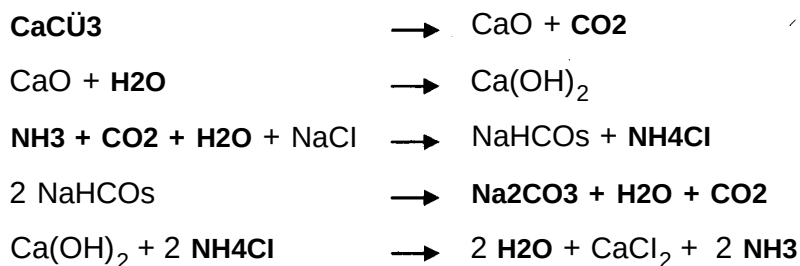
En relación al carbonato de sodio, se conoce que recién en 1823 se instaló en

15 Inglaterra la primera planta para fabricarlo a escala industrial aplicando el proceso concebido por Nicolás Leblanc (6), el mismo que se mantuvo vigente hasta 1885 aproximadamente, siendo las principales reacciones químicas del referido proceso las siguientes:

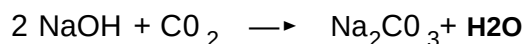


En 1861, Ernest Solvay (7) concibió el proceso que lleva su nombre y que logró en breve plazo liderar la producción mundial de carbonato de sodio, habiéndose instalado en Bélgica en 1865 la primera planta industrial aplicando este proceso. Después, en 1874, se instaló otra planta en Inglaterra y en 1882, se instaló en Estados Unidos de

25 Norteamérica la de mayor tamaño en su época, la misma que funciona hasta la actualidad. Posteriormente, en 1988, se instaló en Francia la planta industrial para fabricar carbonato de sodio más grande del mundo aplicando el Proceso Solvay, el cual tiene como principales reacciones químicas las siguientes:



En el Perú, desde 1955 (8) se estuvo realizando estudios acerca de la posibilidad de instalar una planta de carbonato de sodio; sin embargo, recién data desde 1978 (9), el año en que se proyectó la instalación de una planta de carbonato de sodio, lo cual se efectivizó y se puso en marcha en 1988 (10), conociéndose esta tecnología con el nombre de Proceso Soda - Gas Carbónico, la cual se fundamenta en la siguiente reacción química:



10 DESCRIPCIÓN DE LA INVENCION

La innovación tecnológica desarrollada permite extraer, además de hierro, metales tales como, sin limitarse a, plomo, plata, zinc, cobre, molibdeno, antimonio, arsénico, con o sin hierro asociados, y con oro que pudiera estar contenido como inclusión en determinados casos, a partir de los minerales sulfurados que los contienen, aplicándose para ello un mejorado proceso de reducción directa a los metales que se desea extraer, lo cual es logrado sin emisiones de anhídrido sulfuroso y sin producir las escorias que generan las plantas pirometalúrgicas convencionales, minimizando la contaminación ambiental. Además, mediante la regeneración y reciclaje del agente reductor hierro y del fundente carbonato de sodio propuestos, se reducen sustancialmente los costos operativos del proceso.

Esta tecnología también puede ser aplicada a la remediación de los depósitos de relaves que contienen diversos sulfuros metálicos ferrosos y no ferrosos. Actualmente la matriz minero metalúrgica en el mundo contempla que las plantas concentradoras sólo recuperen, mediante el proceso de flotación selectiva, los sulfuros metálicos de valor comercial tales como galena argentífera: PbS con Ag , calcopirita: CuFeS_2 con Au y esfalerita: ZnS , dejando en los relaves grandes cantidades de sulfuros de hierro como pirita, pirrotita y arsenopirita, los cuales son deprimidos en las celdas de flotación

conjuntamente con los minerales no metálicos extraídos de la mina como el cuarzo (S102) principalmente y otros silicatos, los mismos que son acumulados en los depósitos de relaves en condiciones no adecuadas en la mayoría de los casos, siendo ésta una de las principales razones por las cuales los referidos depósitos de relaves tienen un gran potencial de generar las contaminantes aguas ácidas y arsenicales en temporadas de lluvias debido a la alta presencia de sulfuros de hierro y arsénico en los mismos.

La remediación de estos relaves de plantas concentradoras registradas como pasivos ambientales mineros sólo será factible si es que se aprovecha económicamente la mayor parte de las especies mineralógicas existentes en los referidos relaves, tratándose de recuperar principalmente las especies mineralógicas metálicas desechadas como la pirita, la pirrotita y la arsenopirita, no sólo porque estos minerales que conforman las principales especies contaminantes pueden tener importantes valores de oro y plata, sino también porque las mismas pueden constituirse como materia prima para la obtención de hierro metálico por medio de presente innovación tecnológica de bajo costo y de mínimo impacto ambiental, resultando el hierro un producto metalúrgico de importante valor comercial a partir del cual se pueden obtener acero para las industrias de la construcción y metal mecánica.

Complementariamente, también se recuperarían los remanentes de otros sulfuros metálicos de valor comercial por medio de flotación selectiva, siempre que los mismos se encuentren presentes en los depósitos de relaves, resultando importante considerarlos no sólo porque ayudaría a incrementar los ingresos por la venta de los metales no ferrosos que se obtendrían, los cuales serían extraídos a partir de los minerales sulfurados que los contienen mediante la innovación tecnológica desarrollada, sino también porque la aplicación del presente invento permitiría finalmente obtener residuos sólidos verdaderamente limpios, los mismos que podrán ser utilizados en la industria de la construcción, sea como agregados (arena fina) o como materia prima para la fabricación de ladrillos blancos.

En el horno de fundición considerado en este proceso, se funden los concentrados de minerales sulfurados que contienen al metal o metales a extraerse, según sea el caso, para lo cual se utiliza hierro como agente reductor y carbonato de sodio como fundente, resultando como productos el metal o los metales fundidos o pulverulentos,

dependiendo de las propiedades físicas de los mismos, una escoria de composición controlada conformada por óxido ferroso y sulfuro de sodio, y emisiones gaseosas de dióxido de carbono. A efectos de tener un control efectivo en la composición de la escoria, lo cual es indispensable para hacer posible la regeneración y reciclaje del agente reductor y del fundente, se establecen las reacciones generales para los casos abajo indicados, considerando las siguientes definiciones generales:

- **Fe** es un elemento reactante de estado de oxidación cero, que al ser agregado al reactor principal actúa como agente reductor o como facilitador del intercambio atómico entre el azufre y el sodio, según sea el caso.
- **Na₂CO₃** es un compuesto químico reactante denominado carbonato de sodio, el cual es agregado al reactor principal como fundente.
- **Na₂S** es uno de los componentes de la escoria de nombre sulfuro de sodio obtenido como producto de la reacción química general y es altamente soluble en agua.
- **FeO** es el otro componente de la escoria denominado óxido ferroso, obtenido como producto de la reacción química general y es insoluble en agua.
- **CO₂** es el efluente gaseoso de nombre dióxido de carbono, obtenido como producto de la reacción química general.

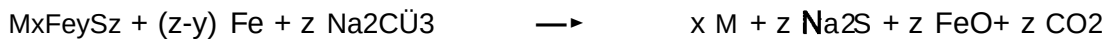
a. Para minerales sulfurados no ferrosos de un solo metal:



Dónde:

- **M** es el metal no ferroso a extraerse tal como, sin limitarse a, plomo, plata, zinc, cobre, molibdeno, antimonio.
- **M_xS_y** es la fórmula química establecida para el mineral sulfurado al que se le va extraer el metal M.
- **x** e **y** indican los números de átomos del metal M a extraerse y del azufre, respectivamente, que existen en **M_xS_y**, de cuyos valores dependen los coeficientes estequiométricos de los demás reactantes y de los productos que se obtienen en el proceso.

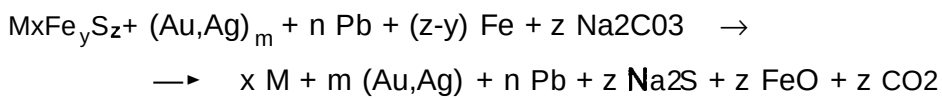
b. Para minerales sulfurados ferrosos de un solo metal:



Dónde:

- **M** es el metal no ferroso a extraerse tal como, sin limitarse a, cobre, arsénico, plomo, zinc.
- **MxFe_ySz** es la fórmula química establecida para el mineral sulfurado ferroso al que se le va extraer el metal M.
- **x, y, z** indican los números de átomos del metal M a extraerse, del hierro y del azufre respectivamente, existentes en MxFe_yS_z , de cuyos valores dependen los coeficientes estequiométricos de los demás reactantes y de los productos que se obtienen en el proceso.

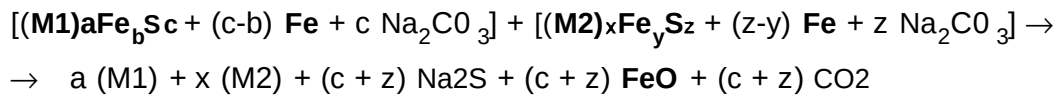
c. Para minerales sulfurados de un solo metal, ferrosos y/o no ferrosos, con Oro y/o Plata:



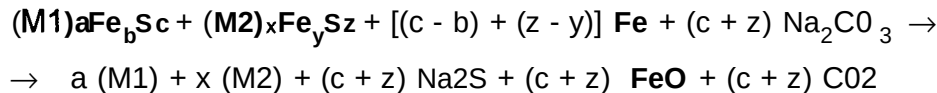
Dónde:

- **M** es el metal no ferroso a extraerse tal como, sin limitarse a, cobre, arsénico, plomo, zinc.
- **MxFe_ySz** es la fórmula química establecida para el mineral sulfurado ferroso y no ferroso (para $y = 0$) al que se le va extraer el metal M y los metales preciosos que se presentan asociados.
- **x, y, z** indican los números de átomos del metal M a extraerse, del hierro y del azufre respectivamente, existentes en MxFe_yS_z , de cuyos valores dependen los coeficientes estequiométricos de los demás reactantes y de los productos que se obtienen en el proceso.
- **(Au,Ag)_m** representan la inclusiones de Oro (Au), Plata (Ag) y Electrum (Au/Ag) que en un número "m" se presentan dentro de la matriz del mineral $\text{M}_x\text{Fe}_y\text{S}_z$.
- **Pb** representa el metal Plomo que en la cantidad "n" se agrega conjuntamente con los reactantes para los efectos de ser el portador final del Oro y la Plata.

d. Para combinaciones de varios minerales sulfurados de un solo metal, ferrosos y/o no ferrosos:



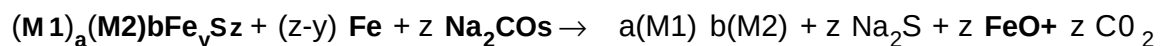
que expresado de otra forma es igual a:



Dónde:

- **M1 y M2** son los metales no ferrosos a extraerse tales como, sin limitarse a, cobre, arsénico.
- **(M1)_aFe_bS_c** y **(M2)_xFe_yS_z** son las fórmulas químicas establecidas para los minerales sulfurados, ferrosos y/o no ferrosos (para y = 0), a los que se le va extraer los metales no ferrosos M1 y M2.
- Los subíndices **a, b, c** así como **x, y, z** indican los números de átomos con los que intervienen tanto los metales M1 y M2 como el Hierro y el Azufre existentes en **(M1)_aFe_bS_c** y **(M2)_xFe_yS_z** respectivamente, de cuyos valores dependen los valores de los coeficientes estequiométricos de los demás reactantes (agente reductor y fundente) y de los productos que se obtienen en el proceso (metales fundidos, escoria y efluente gaseoso).

e. Para minerales sulfurados bimetalicos ferrosos y/o no ferrosos:

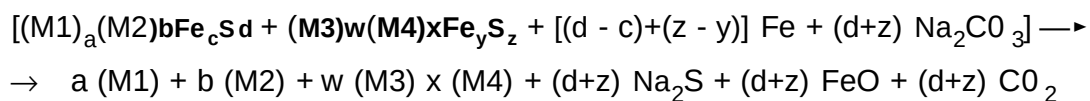


Dónde:

- **M1 y M2** son los metales no ferroso a extraerse tales como, sin limitarse a, antimonio, zinc, cobre, plata, arsénico, cobalto.
- **(M1)_a(M2)_bFe_yS_z** es la fórmula química establecida para el mineral sulfurado ferroso y/o no ferroso (para y = 0) al que se le va extraer los metales no ferrosos M1 y M2.

- Los subíndices **a**, **b** así como **y**, **z** indican los números de átomos con los que intervienen tanto los metales **M1** y **M2** como el Hierro y el Azufre, respectivamente, existentes en $(M1)_a(M2)_bFe_yS_z$, de cuyos valores dependen los coeficientes estequiométricos de los demás reactantes (agente reductor y fundente) y de los productos que se obtienen en el proceso (metales fundidos, escoria y efluente gaseoso).

f. Para combinaciones de minerales sulfurados bimetálicos, ferrosos y no ferrosos:



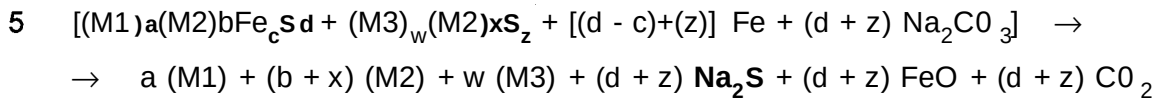
Dónde:

- **M1, M2, M3 y M4** son los metales no ferrosos a extraerse tales como, sin limitarse a, antimonio, zinc, cobre, plata, arsénico, cobalto.
- $(M1)_a(M2)_bFe_cS_d$ y $(M3)_w(M4)_xFe_yS_z$ son las fórmulas químicas establecidas para minerales sulfurados ferrosos y no ferrosos a los que se les va extraer los metales no ferrosos **M1, M2, M3 y M4**.
- Los subíndices **a, b, c, d** así como **w, x, y, z** indican los números de átomos con los que intervienen tanto los metales **M1, M2, M3 y M4** como el Hierro y el Azufre, respectivamente, existentes en $(M1)_a(M2)_bFe_cS_d$ y $(M3)_w(M4)_xFe_yS_z$, de cuyos valores dependen los coeficientes estequiométricos de los demás reactantes (agente reductor y fundente) y de los productos que se obtienen en el proceso (metales fundidos, escoria y efluente gaseoso).

Cabe indicar que la formulación estequiométrica antes indicada tiene validez incluso cuando se presentan alguno (o todos) de los siguientes casos:

- Cuando las fórmulas químicas de los minerales sulfurados bimetálicos contienen un metal no ferroso en común; es decir, cuando **(M1, M2)** es igual en parte a **(M3, M4)**.
- Cuando en la combinación de los minerales sulfurados bimetálicos, uno de los minerales sulfurados es de tipo ferroso y el otro mineral sulfurado es de tipo no ferroso.

En este sentido, la presencia simultánea de ambos casos arriba expresados presentaría la siguiente formulación estequiométrica, donde $M4=M2$, e $y=0$:



BREVE DESCRIPCIÓN DE LAS FIGURAS

10 Figura 1: Proceso de Extracción Metalúrgica

- **1a** Concentrados de Mineral Sulfurado Ferroso y No Ferroso, con inclusiones de Oro en los casos que aplique.
- **1b** Agente reductor (Fe)
- **1c** Fundente (Na_2CO_3)
- 15 - **1d** Escoria (FeO y Na_2S)
- **1e** Metales Fundidos
- **1f** Gas Dióxido de Carbono a reciclaje CO_2
- **1g** Horno de Fundición

20 Figura 2: Disolución y Filtrado de los componentes de la Escoria

- **2a** Agua (H_2O)
- **2b** Escoria (FeO y Na_2S)
- **2c** Sinterización (FeO)
- **2d** Solución Filtrada ($Na_2S + H_2O$)
- 25 - **2e** Disolución y Filtrado

Figura 3: Regeneración del Carbonato de Sodio para su Reciclaje

- **3a** Gas Sulfhídrico o Hidrógeno Sulfurado (H_2S)
- **3b** Solución Filtrada ($Na_2S + H_2O$)
- 30 - **3c** Gas Dióxido de Carbono (CO_2) reciclado
- **3d** Solución Sobresaturada de Carbonato de Sodio ($Na_2CO_3 + H_2O$)
- **3e** Carbonato de Sodio (Na_2CO_3) o Fundente regenerado
- **3f** Horno de Fundición de concentrados
- **3g** Agua (H_2O)

- **3h** Reactor de Soluciones ($\text{Na}_2\text{S} + \text{H}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{CO}_3$): Soluciones Filtrada y Sobresaturada

Figura 4: Eliminación del Gas Sulfhídrico y obtención del Azufre elemental

- 5 - **4a** Agua (H_2O)
- **4b** Aire (O_2)
- **4c** Gas Hidrógeno Sulfurado (H_2S)
- **4d** Reactor Sólido/Gas (Óxido de Hierro Hidratado $\text{Fe}_2(\text{OH})_6$ e Hidrógeno Sulfurado H_2S)
- 10 - **4e** Óxido de Hierro Hidratado regenerado ($\text{Fe}_2(\text{OH})_6$)
- **4f** Azufre Elemental (S)
- **4g** Sulfuro Férrico más Agua ($\text{Fe}_2\text{S}_3 + \text{H}_2\text{O}$)

Figura 5: Sinterización

- 15 - **5a** Residuos de Oxido Ferroso (FeO)
- **5b** Pellets de Oxido Ferroso (FeO)
- **5c** Horno de Sinterización

Figura 6: Generación de Gases Reductores

- 20 - **6a** Gases Reductores ($\text{CO} + \text{H}_2$)
- **6b** Oxígeno del aire y Vapor de Agua (O_2 y H_2O)
- **6c** Carbón (C) o Coque Metalúrgico (C desulfurizado) o Gas Natural (CH_4)
- **6d** Gases reciclados (CO_2 y CO)
- **6e** Horno de Combustión

25

Figura 7: Regeneración del Agente Reductor Hierro para su Reciclaje

- **7a** Gases Reductores ($\text{CO} + \text{H}_2$)
- **7b** Hierro metálico (Fe)
- **7c** Pellets de Óxido Ferroso (FeO)
- 30 - **7d** Horno de Reducción

Figura 8: Proceso Integrado para extraer metales Ferrosos y no Ferrosos, y Oro como inclusión según aplique, mediante la fundición de los concentrados de minerales sulfurados que los contienen, con regeneración y reciclaje de los insumos metalúrgicos

35

- **8a** Concentrados de minerales sulfurados metálicos, con inclusiones de Oro según aplique
- **8b** Agente reductor Hierro (Fe) Reciclado
- **8c** Fundente Carbonato de Sodio (Na_2CO_3) Reciclado
- 5 - **8d** Escorias Óxido Ferroso y Sulfuro de Sodio ($\text{FeO} + \text{Na}_2\text{S}$)
- **8e** Metales Fundidos
- **8f** Gas Dióxido de Carbono (CO_2) a reciclaje
- **8g** Horno de Fundición de Concentrados
- **8h** Agua (H_2O)
- 10 - **8i** Disolución y Filtrado
- **8j** Residuos de Óxido Ferroso (FeO)
- **8k** Reactor de Soluciones ($\text{Na}_2\text{S} + \text{H}_2\text{O}$)
- **8l** Agua (H_2O)
- **8m** Solución Preparada ($\text{Na}_2\text{CO}_3 + \text{H}_2\text{O}$)
- 15 - **8n** Carbonato de Sodio (Na_2CO_3) Regenerado
- **8ñ** Gas Sulfhídrico (H_2S)
- **8o** Horno de Sinterización
- **8p** Pellets de Óxido Ferroso (FeO)
- **8q** Hierro metálico o Hierro Esponja (Fe)
- 20 - **8r** Gases reciclados (CO_2 y CO)
- **8s** Horno de Reducción
- **8t** Horno de Combustión
- **8u** Carbón (C) o Coque Metalúrgico (C desulfurizado) o Gas Natural (CH_4)
- **8v** Aire y vapor de agua (O_2 y H_2O)
- 25 - **8w** Gases Reductores (CO y H_2)
- **8x** Reactor Sólidos/Gas: Óxido de Hierro Hidratado ($\text{Fe}_2(\text{OH})_6$) e Hidrógeno Sulfurado (H_2S)
- **8y** Sulfuro Férrico + Agua ($\text{Fe}_2\text{S}_3 + \text{H}_2\text{O}$)
- **8z** Azufre elemental (S)
- 30 - **8aa** Óxido de hierro hidratado ($\text{Fe}_2(\text{OH})_6$)
- **8ab** Agua (H_2O)
- **8ac** Aire (O_2)

DESCRIPCIÓN DETALLADA DE LAS FIGURAS

Este invento comprende un nuevo proceso tecnológico conformado por siete etapas, las cuales se esquematizan con detalle en los siguientes diagramas.

- 5 > FIGURA N°1: Se muestra el diagrama del proceso metalúrgico para la extracción de metales tales como, sin limitarse a, plomo, plata, zinc, cobre, molibdeno, antimonio, arsénico, hierro, oro incluido según aplique, mediante la fundición de concentrados de minerales sulfurados no ferrosos y/o ferrosos que los contienen **(1a)**. Este proceso se realiza en un horno de fundición **(1g)** al cual se le agrega 3 reactantes: el Concentrado de Mineral No Ferroso y/o Ferroso, con oro como
- 10 inclusión según aplique **(1a)**, el agente reductor Hierro o Fe **(1b)** y el fundente Carbonato de Sodio o Na_2CO_3 **(1c)** para luego obtenerse como resultado del proceso metalúrgico el metal o metales fundidos conformados por los elementos metálicos contenido en los concentrados de mineral no ferroso y/o ferroso, incluido el oro según aplique **(1e)**, una escoria compuesta por Óxido Ferroso o
- 15 FeO y Sulfuro de Sodio o Na_2S **(1d)** y el efluente gaseoso Dióxido de Carbono o CO_2 **(1f)** que será captado y enviado a reciclaje.
- > FIGURA N° 2: Se presenta un diagrama del proceso de disolución de un componente de la escoria generada en el horno de fundición de concentrados de
- 20 minerales no sulfurados y/o sulfurados, referido en la etapa anterior, en donde la escoria, conformada por Óxido Ferroso o FeO y Sulfuro de Sodio o Na_2S **(2b)**, más Agua o H_2O **(2a)** son agregadas a un Reactor de Disolución con posterior filtrado **(2e)**, obteniéndose dos productos: una solución filtrada de Sulfuro de Sodio o Na_2S y Agua o H_2O **(2d)** y un residuo sólido de Óxido Ferroso o FeO que,
- 25 previa aglomeración, será sinterizado **(2c)**.
- > FIGURA N° 3: Se presenta un diagrama del proceso de regeneración del fundente carbonato de sodio, este proceso ocurre en un Reactor de Soluciones **(3h)** donde se agrega la solución filtrada de sulfuro de sodio ($\text{Na}_2\text{S} + \text{H}_2\text{O}$) **(3b)**, una solución sobresaturada de carbonato de sodio y agua ($\text{Na}_2\text{CO}_3 + \text{H}_2\text{O}$) **(3d)**, insuflándosele
- 30 a esta mezcla el gas Dióxido de Carbono o CO_2 reciclado **(3c)**, para luego obtener 3 productos: Gas Sulfhídrico o H_2S **(3a)** que será captado para su posterior procesamiento, Agua o H_2O **(3g)** y Carbonato de Sodio (Na_2CO_3) regenerado **(3e)** el cual será reciclado al proceso, la mayor parte será utilizado en el horno de

fundición de concentrados **(3f)**, y otra pequeña parte en la preparación de la solución sobresaturada de carbonato de sodio más agua ($\text{Na}_2\text{CO}_3 + \text{H}_2\text{O}$) **(3d)**.

5 > FIGURA N° 4: Se muestra un diagrama del proceso de eliminación del Gas Sulfhídrico y obtención del Azufre, para lo cual se insufla el Gas Sulfhídrico o H_2S **(4c)** a un Reactor Sólido/Gas **(4d)** que contiene cristales de Óxido de Hierro hidratado o $\text{Fe}_2(\text{OH})_6$ **(4e)**, haciéndose reaccionar ambos compuestos para producir Sulfuro Férrico o Fe_2S_3 más Agua o H_2O **(4g)**, luego a estos productos se le adiciona aire el cual contiene Oxígeno u O_2 **(4b)**, originando una reacción que
10 genera 3 productos: Agua o H_2O **(4a)**, Azufre elemental o S **(4f)** y Óxido de Hierro hidratado o $\text{Fe}_2(\text{OH})_6$ **(4e)** que será reciclado al mismo proceso.

15 > FIGURA N° 5: En este diagrama se representa el proceso de Sinterización de los residuos sólidos de Óxido Ferroso o FeO **(5a)**, los cuales fueron obtenidos como consecuencia de la disolución de un componente de la escoria y su posterior filtrado. Previo a la sinterización, los referidos residuos sólidos son aglomerados **(5b)** con lo cual quedan listos para ser sometidos a calentamiento con temperatura controlada en un Horno de Sinterización **(5c)**, en donde se compactan para endurecerse luego con el enfriamiento que sigue a continuación,
20 conformándose así los denominados "Pellets", los cuales adquieren la resistencia a la compresión requerida para la regeneración del agente reductor Hierro.

25 > FIGURA N° 6: Este diagrama representa el proceso de Combustión del Carbón, Coque Metalúrgico o Gas Natural para la generación de los gases reductores Monóxido de Carbono e Hidrógeno, los cuales se obtienen dentro de un Horno de Combustión **(6e)** agregándole carbón o coque metalúrgico o gas natural **(6c)**, aire y vapor de agua (O_2 y H_2O) **(6b)** y los gases reciclados Dióxido de Carbono o CO_2 (residual del proceso de reducción del hierro) y , Monóxido de Carbono o CO (remanente del gas reductor que no reaccionó), vapor de agua o H_2O y Gas
30 Natural o CH_4 si este último fue utilizado **(6d)**, para nuevamente tener como producto del Horno de Combustión los gases reductores Monóxido de Carbono (CO) e Hidrogeno (H_2) **(6a)**.

35 > FIGURA N° 7: El diagrama representa el proceso de regeneración del agente reductor mediante la reducción del Hierro contenido en el Óxido Ferroso, para lo

cual se utiliza los gases reductores Monóxido de Carbono e Hidrogeno. En este proceso, los Pellets de Óxido Ferroso o FeO **(7c)** son introducidos dentro del Horno de Reducción **(7d)** y luego se le inyectan los Gases Reductores Monóxido de Carbono o CO e Hidrogeno o H₂ **(7a)**, obteniéndose de esta manera el Hierro metálico o Fe **(7b)** al reducirse el estado de oxidación del Óxido Ferroso de +2 a cero, con lo cual se consigue la regeneración del agente reductor para su reciclaje al horno de fundición de concentrados de minerales sulfurados en el que se extraen los metales no ferrosos, precisándose que, conjuntamente con el efluente gaseoso Dióxido de Carbono o CO₂ **(7e)**, también sale del horno de Reducción el remanente del gas reductor Monóxido de Carbono o CO que no reaccionó en el proceso.

> FIGURA N° 8: Finalmente, mediante la integración secuencial de todas las figuras precedentes se establece un nuevo Proceso Metalúrgico para la extracción de metales no ferrosos y ferrosos a partir de los minerales sulfurados que los contienen **(8a)**, mejorando el estado de la técnica, ya que ello permite que la aplicación del proceso pirometalúrgico de reducción directa se realice con costos operativos reducidos y una mínima contaminación ambiental como consecuencia de la regeneración y reciclaje del agente reductor Hierro o Fe **(8b)** y del fundente Carbonato de Sodio o Na₂CO₃ **(8c)**.

EJEMPLOS PREFERIDOS (O REALIZACIÓN PREFERENTE DE LA INVENCION)

Ejemplos Preferidos de la aplicabilidad real de la Innovación Tecnológica descrita en los puntos precedentes:

1. Primer Ejemplo Preferido: Extracción de Cobre y Oro, u otros metales tales como Cobalto, Arsénico y Hierro, según aplique, mediante la Fundición de concentrados del minerales sulfurados que los contienen, tales como Calcopirita, Calcosina, Bornita, Enargita, Carrotite y Tenantita.

La extracción de los metales Cobre, Oro como inclusión, y otros metales a partir de la de los minerales sulfurados que los contienen (Calcopirita (CuFeS₂), Calcosina: Cu₂S, Bornita: Cu₅FeS₄, Enargita: Cu₃AsS₄, Carrotite: Cu₂CoS₄ y Tenantita: Cu₁₂As₄S₁₃) a los cuales pueden estar asociados, se fundamenta en utilizar cantidades apropiadas tanto

del agente reductor Hierro (Fe), así como del fundente Carbonato de Sodio (Na₂CO₃), resultando como productos de la reacción química que ocurre entre los referidos reactantes lo siguiente: Cobre (Cu) metálico fundido con Oro si este estuvo como inclusión, una escoria constituida por Óxido Ferroso (FeO) y Sulfuro de Sodio (Na₂S), y emisiones gaseosas de Dióxido de Carbono (CO₂).

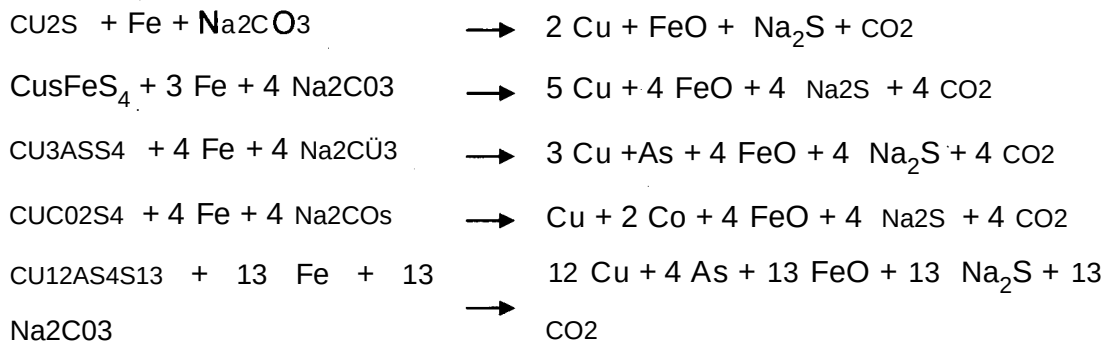
En el caso de la Calcopirita se parte de la fórmula química que se tiene establecida para este mineral sulfurado: CuFeS₂, a partir del cual se extrae el Cobre (Cu) metálico, precisándose que la fundición de los concentrados del referido mineral sulfurado conjuntamente con Hierro (Fe) como agente reductor y con Carbonato de Sodio (Na₂CO₃) como fundente debe realizarse considerando las cantidades estequiométricas apropiadas no sólo para que ocurra la reducción directa del Cobre (Cu), sino también para tener controlada la composición de la escoria que se va a producir, de modo que en los procesos sub siguientes se posibilite la regeneración y reciclaje tanto del agente reductor Hierro (Fe) como del fundente Carbonato de Sodio (Na₂CO₃), lo cual implica que se debe cuidar que la escoria del proceso de reducción directa del Cobre (Cu) no esté conformada por tres o más compuestos, sino solamente por dos, siendo necesario que uno de ellos sea soluble en Agua, es decir, debe estar conformada por el compuesto insoluble Óxido Ferroso (FeO) y por el compuesto altamente soluble Sulfuro de Sodio (Na₂S), de forma que los productos de la reacción química a ocurrir en el reactor sean el Cobre (Cu) metálico fundido de alta densidad, conteniendo Oro si es que este estuvo como inclusión, una escoria alcalina y fluida de baja densidad, y el efluente gaseoso Dióxido de Carbono (CO₂), esto es según la siguiente reacción:



Precisándose que la cantidad de fundente que debe agregarse al reactor debe ser la apropiada como para que en la escoria no se forme Sulfuro Ferroso (FeS). Conforme a la termodinámica química, la reacción empieza a ocurrir a partir de los 1100°C, debiéndose completar preferentemente a los 1350°C.

Debido a los mecanismos de reacción involucrados, en el proceso de reducción directa del Cobre a partir de los minerales sulfurados que lo contienen (Calcopirita, Calcosina, Bornita, Enargita, Carrotite y Tenantita), se tiene por un lado que el número de átomos

gramo de Hierro (Fe), o su equivalente en peso, que será necesario considerar como agente reductor reaccionante en el referido proceso está en relación directa con el número de átomos de Azufre (S) que contiene el mineral sulfurado de cobre debiéndosele reducir a la cantidad resultante, si el caso aplica, los átomos gramos de Hierro, o su equivalente en peso, que estén contenidos en los minerales sulfurados de Cobre como son los casos de la Calcopirita y la Bornita. Por otro lado, también se tiene que el número de moles de Carbonato de Sodio (Na_2CO_3), o su equivalente en peso, que debe considerarse como fundente reaccionante en el referido proceso, está igualmente relacionada en forma directa con la cantidad de átomos de Azufre existentes en la fórmula química de la Calcopirita o de los otros minerales sulfurados que contienen Cobre tales como Calcosina, Bornita, Enargita, Carrotite y Tenantita, según las respectivas reacciones químicas que siguen a continuación:



2. Segundo Ejemplo Preferido: Extracción de Plomo y Plata mediante la Fundición de concentrados de minerales sulfurados de Plomo tal como la Galena y de Plata tal como la Acanita solos o asociados:

En este proceso, la extracción del metal Plomo a partir de la Galena (PbS), o del mineral sulfurado que lo contiene, se fundamenta en la utilización apropiada tanto del Hierro (Fe) como agente reductor como del Carbonato de Sodio (Na_2CO_3) como fundente, resultando como productos de la reacción química que ocurre entre los referidos reactantes lo siguiente: Plomo metálico fundido, una escoria conformada por Óxido Ferroso (FeO) y Sulfuro de Sodio (Na_2S), y emisiones gaseosas de Dióxido de Carbono (CO_2). A fin de tenerse un control efectivo en la conformación de la escoria, esto es dada su importancia, se parte de la fórmula química que se tiene establecida para la Galena o Sulfuro de Plomo: PbS , mineral sulfurado a partir del cual se extraer el Plomo metálico, debiéndose considerar que la aplicación del proceso de reducción

directa mejorado implica la utilización del agente reductor y del fundente en las proporciones estequiométricas apropiadas a fin de que, en los siguientes procesos, la regeneración y reciclaje de los referidos insumos metalúrgicos sean factibles. Para estos efectos, resulta indispensable que la escoria, al final, esté conformada no por tres o más compuestos, sino sólo por dos, y uno de ellos soluble en Agua. En tal sentido, debe propiciarse que la escoria obtenida del Horno de Fundición de extracción de Plomo metálico sólo esté conformada por el compuesto insoluble Óxido Ferroso (FeO) y por el compuesto soluble en agua Sulfuro de Sodio (Na₂S), lo cual requiere que se tenga controlada la formación de Sulfuro Ferroso (FeS) en la escoria, y se puede lograr si es que la reacción principal del referido proceso de reducción directa utilizando el Hierro (Fe) como agente reductor y el Carbonato de Sodio (Na₂CO₃) como fundente es la siguiente:



- De acuerdo con la termodinámica química la reacción anterior empieza a ocurrir a partir de los 950°C y debe completarse preferentemente 1400°C.

Así mismo, en el proceso de extracción de la Plata a partir de los minerales sulfurados que la contienen tal como, sin limitarse a, la Acantita o Ag₂S (Argentita a temperaturas mayores a 177°C), igualmente se fundamenta en la utilización apropiada tanto del Hierro (Fe) como agente reductor como del Carbonato de Sodio (Na₂CO₃) como fundente, resultando como productos de la reacción química que ocurre entre los referidos reactantes lo siguiente: Plata metálica fundida, una escoria conformada por Óxido Ferroso (FeO) y Sulfuro de Sodio (Na₂S), y emisiones gaseosas de Dióxido de Carbono (CO₂). Respecto de la escoria se tienen los mismos criterios y fundamentos técnicos para su conformación, para lo cual es necesario que la reacción química que ocurra dentro del horno en el que se funde los concentrados de minerales sulfurados de plata sea la siguiente:



Conforme a la termodinámica química la reacción anterior empieza a ocurrir a partir de los 775°C y debe completarse preferentemente 1425°C.

Sin embargo, por lo general, a la Galena (PbS) vienen asociados diversos minerales sulfurados de Plata como la Acantita (**Ag₂S**) de modo que en el horno de fundición deben manejarse los reactantes, de modo tal que ocurra la siguiente reacción química:



5

Nótese que la Acantita o Ag₂S aporta un átomo más de Azufre (S) en los reactantes, lo cual debe reflejarse en las cantidades que se deben agregar del agente reductor Hierro y del fundente Carbonato de Sodio. De acuerdo con la termodinámica química, la reacción anterior empieza a ocurrir a partir de los 950°C y debe completarse preferentemente a los 1150°C, aunque realizada la experiencia se verificó que la reacción ocurre en forma completa a los 950°C.

10

De lo anterior se concluye que en el proceso de reducción directa del Plomo a partir del mineral sulfurado que lo contiene, por un lado se tendrá que el número de moles de Carbonato de Sodio (Na₂CO₃), o su equivalente en peso, que debe considerarse como fundente reaccionante en el proceso está en relación directa de los átomos de azufre existentes en la fórmula química de la Galena o Sulfuro de Plomo (PbS), compuesto mineralógico que contiene el metal Plomo a extraerse. Así mismo, el número de átomos gramo de Hierro (Fe), o su equivalente en peso, que será necesario considerar como agente reductor reaccionante en el referido proceso está directamente relacionada con el número de moles gramo de Óxido Ferroso (FeO) que se obtendrá como producto y como ello depende del número de moles gramo de Oxígeno (O₂) que se liberará como tal en la reacción química, se infiere que lo requerido de átomos gramo de Hierro (Fe) dependerá del número de moles de Carbonato de Sodio (Na₂CO₃) considerados como fundente y por ende también del número de átomos de Azufre (S) que contiene la Galena o Sulfuro de Plomo (PbS).

20

25

3. Tercer Ejemplo Preferido: Extracción de Zinc y Plata mediante la Fundición de concentrados de minerales sulfurados de Zinc, tal como la Esfalerita, y de Plata, tal como la Acantita, solos o asociados:

30

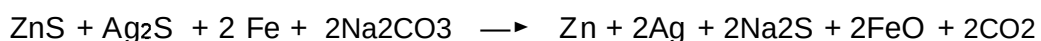
En este proceso, la extracción del metal Zinc a partir de la Esfalerita (ZnS) o del mineral sulfurado que lo contiene se realiza aplicando el proceso de reducción directa mejorado, fundamentándose el mismo en la utilización apropiada tanto del Hierro (Fe)

como agente reductor, así como del Carbonato de Sodio (**Na₂CO₃**) como fundente, resultando como productos de la reacción química que ocurre entre los referidos reactantes lo siguiente: Zinc metálico gaseoso (posteriormente licuado por condensación), una escoria fluida y liviana conformada por Óxido Ferroso (FeO) y Sulfuro de Sodio (Na₂S), y emisiones gaseosas de Dióxido de Carbono (CO₂). Dada su importancia, también es necesario que durante la ocurrencia del referido proceso de reducción directa se tenga un control efectivo en la conformación de la escoria, para lo cual estando cargado el horno de fundición con los minerales concentrados de Esfalerita, se procede a agregarle el Hierro (Fe) como agente reductor y el Carbonato de Sodio (**Na₂CO₃**) como fundente, precisándose que la utilización de estos insumos metalúrgicos debe hacerse en proporciones estequiométricas de tal modo que a partir de los productos obtenidos de la reacción química, posteriormente, sea posible la regeneración y reciclaje tanto del agente reductor como del fundente. Esto puede lograrse si es que se cuida que la escoria esté principalmente conformada no por tres o más compuestos, sino sólo por dos, y uno de ellos soluble en Agua. En tal sentido, debe propiciarse que la escoria obtenida del Horno de Fundición de extracción de Zinc metálico sólo esté conformada por el compuesto insoluble Óxido Ferroso (FeO) y por el compuesto soluble en agua Sulfuro de Sodio (Na₂S), lo cual implica que debe tenerse controlada la no formación de Sulfuro Ferroso (FeS) en la escoria, para lo cual es necesario que la reacción química del referido proceso sea la siguiente:



De acuerdo con la termodinámica química, la reacción anterior empieza a ocurrir a partir de los 1000°C y se completa preferentemente a los 1850°C.

En tal sentido, si a la Esfalerita (ZnS) vienen asociados minerales sulfurados de Plata tal como la Acantita (Ag₂S), entonces, dentro del horno de fundición, la reacción química que ocurrirá es la siguiente:



Nótese que la Plata, al presentarse asociada a los sulfuras de zinc en forma de Acantita o Ag₂S, aporta un átomo más Azufre (S) en los reactantes, lo cual incidirá en las cantidades que se requiera del agente reductor Hierro y del fundente Carbonato de

Sodio. Conforme a la termodinámica química, la reacción anterior empieza a ocurrir a partir de los 950°C y debe completarse preferentemente a los 1150°C.

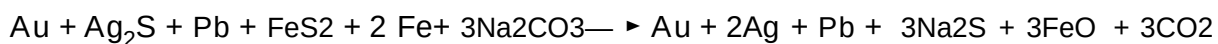
De lo anterior se concluye que en el proceso de reducción directa del Zinc a partir del mineral sulfurado que lo contiene, por un lado se tendrá que el número de moles de Carbonato de Sodio (**Na₂CO₃**), o su equivalente en peso, que debe considerarse como fundente reaccionante en el proceso está en relación directa de los átomos de azufre existentes en la fórmula química de la Esfalerita (ZnS), compuesto mineralógico que contiene el metal Zinc a extraerse. Así mismo, el número de átomos gramo de Hierro (Fe), o su equivalente en peso, que será necesario considerar como agente reductor reaccionante en el referido proceso está directamente relacionada con el número de moles gramo de Oxido Ferroso (FeO) que se obtendrá como producto y como ello depende del número de moles gramo de Oxígeno (O₂) que se liberará como tal en la reacción química, se infiere que lo requerido de átomos gramo de Hierro (Fe) dependerá del número de moles de Carbonato de Sodio (**Na₂CO₃**) considerados como fundente y por ende también del número de átomos de Azufre (S) que contiene la Esfalerita (ZnS).

4. Cuarto Ejemplo Preferido: Extracción de Oro, Plata y Hierro mediante la fundición de minerales concentrados de sulfuras de Hierro auríferos tales como, sin limitarse a, Pirita, Pirrotita y Marcasita.

En este proceso la extracción de los metales Oro (Au), Plata (Ag) y el mismo Hierro (Fe) contenido en los minerales sulfurados de este último metal, tales como Pirita (FeS₂), Pirrotita (FeS), Marcasita (FeS₂), se realiza en principio aplicando la reducción directa mejorada, utilizándose en forma apropiada el fundente Carbonato de Sodio principalmente y, en forma complementaria, el Hierro como facilitador del intercambio atómico, dependiendo ello de la especie mineralógica que se trate. En el caso de los minerales monosulfurados de hierro (pirrotita), el referido metal Hierro contenido en estos resulta suficiente para que ocurran entre los reactantes las reacciones químicas que permiten a la extracción del Oro y la Plata. En el caso de los minerales bisulfurados de hierro, dado que se tiene el doble de átomos de azufre entre los reactantes, siempre va a ser necesario agregar la cantidad de Hierro estequiométricamente necesaria como reactante para que éste actúe eficientemente como facilitador del intercambio atómico en la reacción química. Sin embargo, para que ocurra una efectiva extracción de los

referidos metales preciosos Oro y Plata, es necesario introducir dentro del horno de fundición no sólo los concentrados de minerales sulfurados de Hierro conjuntamente con el fundente Carbonato de Sodio y Hierro adicional si fuera necesario, sino también Plomo metálico, a fin que este último conjuntamente con los metales preciosos Oro y Plata conformen un producto metálico fundido de alta densidad factible de ser colado y que, a su vez, sea fácilmente separable del otro producto denominado escoria, la misma que tendrá baja densidad y baja viscosidad debido a que estará conformada principalmente por Óxido Ferroso (FeO) y Sulfuro de Sodio (Na₂S), resultando también como un tercer producto las emisiones gaseosas de Dióxido de Carbono (CO₂).

Asimismo, es importante precisar que el metal Plomo, el mismo que es agregado al horno de fundición conjuntamente con los reactantes, finalmente es obtenido como un producto metálico fundido portador de los metales Oro y Plata también fundidos. Por otro lado, para los efectos de tener un control efectivo en la conformación de la escoria, es necesario que la fundición de los concentrados de sulfuras de Hierro, como en el caso de las Piritas auríferas, la cual es cargada al horno conjuntamente con el Hierro (Fe) adicional requerido y el indispensable Carbonato de Sodio (**Na₂CO₃**) como fundente, debe realizarse considerando las cantidades estequiométricas apropiadas de estos insumos metalúrgicos, no sólo para que se obtenga las máximas recuperaciones de Oro y Plata, sino también para atender la necesidad de tener controlada la composición de la escoria a producirse, de modo que en los procesos subsiguientes se posibilite la regeneración y reciclaje tanto del agente reductor Hierro (Fe) como del fundente Carbonato de Sodio (Na₂CO₃). Esto implica que se debe cuidar que la escoria del proceso de extracción de Oro (Au) esté conformada no por tres compuestos o más, sino sólo por dos, y uno de ellos soluble en Agua, de forma que los tres productos de la reacción química que ocurre en el horno de fundición sean, en primer término, el referido producto metálico fundido de alta densidad conformado por Oro, Plata y Plomo, en segundo término, una escoria fluida de baja densidad conformada por Óxido Ferroso y Sulfuro de Sodio (FeO y Na₂S) y, finalmente, el efluente gaseoso Dióxido de Carbono (CO₂), según la siguiente reacción:



De acuerdo con la termodinámica química y considerando los costos energéticos que implica, el rango de temperatura en el que ocurre preferentemente la reacción es entre

775°C - 950°C. La anterior reacción química es ilustrativa, ya que es conocido que la especie mineralógica que contiene la Plata se presenta en cantidades (Onzas/Tonelada) comparativamente mucho menores que las cantidades porcentuales con que se presenta Pirita.

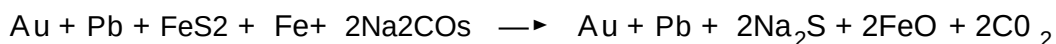
5

Nótese que la Plata se presenta en asociada a los sulfuras de hierro en forma de Acantita Ag_2S (Argentita por encima de los 177°C) y, por ende, aporta un átomo más Azufre (S) en los reactantes, lo cual incidirá en las cantidades que se requiera del agente reductor Hierro y del fundente Carbonato de Sodio. Así mismo, se precisa que la cantidad de fundente que debe agregarse al reactor debe ser la apropiada como para que en la escoria no se forme Sulfuro Ferroso (FeS).

10

15

De lo anterior se puede inferir que, en el caso que ningún mineral sulfurado de Plata se presente asociado a la Pirita (FeS_2), y que esta se caracterice por ser sólo aurífera, entonces en el horno de fundición ocurrirá la siguiente reacción química:



20

25

30

En concordancia con la termodinámica química y considerando los costos energéticos, el rango de temperatura en el que ocurre preferentemente la reacción es entre 750°C - 950°C, debiendo precisarse que el proceso de extracción de Oro a partir de la Pirita aurífera o Bisulfuro de Hierro (FeS_2) se caracteriza porque, por un lado, se tendrá que el número de átomos gramo de Hierro (Fe), o su equivalente en peso, que será necesario considerar como agente reductor reaccionante en el referido proceso, está en relación directa con el número de átomos de Azufre (S) que contenga la Pirita o Bisulfuro de Hierro (FeS_2), haciéndose la salvedad que deberá deducirse en este cómputo los átomos gramos de Hierro, o su equivalente en peso, que estén contenidos en la Pirita aurífera. Y, por otro lado, el número de moles de Carbonato de Sodio (Na_2CO_3), o su equivalente en peso, que debe considerarse como fundente reaccionante en el proceso de extracción de Oro también está en relación directa a la cantidad de átomos de Azufre existentes en la fórmula química de la Pirita o Bisulfuro de Hierro (FeS_2).

Cabe precisar que mediante procesos metalúrgicos complementarios, como la disolución de parte de la escoria (del soluble Sulfuro de Sodio o Na_2S), el filtrado de los

residuos sólidos (FeO), la aglomeración y sinterización de los pellets de Óxido Ferroso (FeO) y la reducción del Hierro a partir de los pellets de FeO utilizando gases reductores (Monóxido de Carbono e Hidrógeno), se obtiene finalmente el hierro metálico.

5

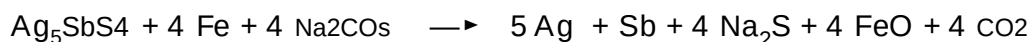
5. Quinto Ejemplo Preferido: Extracción de Antimonio y Plata mediante la Fundición de concentrados de los minerales Estibina, Estefanita y Tetraedrita.

En este proceso, la extracción del metal Antimonio a partir del mineral sulfurado que lo contiene se realiza aplicando la reducción directa mejorada con regeneración y reciclaje de los insumos metalúrgicos involucrados, fundamentándose el mismo en la utilización apropiada tanto del Hierro (Fe) como agente reductor como del Carbonato de Sodio (Na₂CO₃) como fundente, resultando como productos de la reacción química que ocurre entre los referidos reactantes lo siguiente: Antimonio metálico, escoria conformada principalmente por el compuesto insoluble Óxido Ferroso (FeO) y por el compuesto Sulfuro de Sodio (Na₂S) soluble en agua, y, emisiones gaseosas conformadas principalmente por Dióxido de Carbono (CO₂). A fin de tenerse un control efectivo en la conformación de la escoria, se parte del hecho de tenerse en el horno de fundición los minerales concentrados de Estibina o Trisulfuro de Antimonio (Sb₂S₃), mineral sulfurado a partir del cual se extrae el Antimonio metálico. Seguidamente se agrega al referido reactor el agente reductor Hierro (Fe) y el fundente Carbonato de Sodio (Na₂CO₃) en las proporciones estequiometrias que permitan que, en los subsiguientes procesos, la referida regeneración y reciclaje de los mencionados insumos metalúrgicos sea factible; para tales efectos debe tenerse controlada la conformación de la escoria, cuidando de que ésta última esté constituida no por tres o más compuestos, sino sólo por dos, y uno de ellos soluble en Agua. En tal sentido, debe propiciarse que la escoria obtenida del Horno de Fundición de extracción de Antimonio metálico sólo esté conformada por Óxido Ferroso (FeO) y Sulfuro de Sodio (Na₂S), lo cual implica que debe tenerse controlada la formación de Sulfuro Ferroso (FeS) en la escoria para lo cual es necesario que la reacción del referido proceso de reducción directa utilizando el Hierro (Fe) como agente reductor y el Carbonato de Sodio (Na₂CO₃) como fundente sea la siguiente:

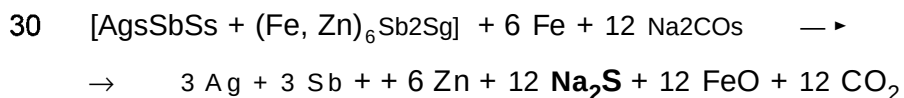


Para este caso, la termodinámica química indica que la reacción empieza a ocurrir a partir de los 300°C y debe completarse preferentemente a los 625°C.

- De lo anterior, se concluye que en el proceso de reducción directa del Antimonio a partir del mineral sulfurado que lo contiene, por un lado se tendrá que el número de moles de Carbonato de Sodio (**Na₂CO₃**), o su equivalente en peso, que debe considerarse como fundente reaccionante en el proceso está en relación directa de los átomos de azufre existentes en la fórmula química de la Estibina o Trisulfuro de Antimonio (Sb₂S₃), compuesto mineralógico que contiene el metal Antimonio a extraerse. Así mismo, el número de átomos gramo de Hierro (Fe), o su equivalente en peso, que será necesario considerar como agente reductor reaccionante en el referido proceso está directamente relacionada con el número de moles gramo de Oxido Ferroso (FeO) que se obtendrá como producto y, como ello depende del número de moles gramo de Oxígeno (O₂) que se liberará como tal en la reacción química, se concluye que lo requerido de átomos gramo de Hierro (Fe) dependerá del número de moles de Carbonato de Sodio (Na₂CO₃) considerados como fundente y por ende también del número de átomos de Azufre (S) que contiene el mineral concentrado de Estibina o Trisulfuro de Antimonio (Sb₂S₃).
- Respecto de la extracción de Plata y Antimonio a partir de la Estefanita (Ag₅SbS₄) se aplica lo establecido para minerales sulfurados no ferrosos de dos metales poliatómicos:



- En relación a la extracción de Antimonio y Plata a partir de la Tetraedrita argentífera (Ag₃SbS₃ + x(Fe, Zn)₆Sb₂S₉), considerando para este caso que x = 1 y que la plata ha sustituido al cobre en la sulfosal, se aplica lo establecido para las combinaciones de minerales sulfurados Bimetálicos ferrosos y no ferrosos:



6. Sexto Ejemplo Preferido: Extracción de Molibdeno mediante la Fundición de concentrados del mineral Molibdenita.

En este proceso, la extracción del metal Molibdeno a partir del mineral sulfurado que lo contiene (Molibdenita o MoS_2) se realiza mediante la aplicación del proceso de reducción directa mejorado, fundamentándose en la utilización apropiada tanto del Hierro (Fe) como agente reductor, así como del Carbonato de Sodio (Na_2CO_3) como fundente, resultando como productos de la reacción química que ocurre entre los referidos reactantes lo siguiente: Molibdeno metálico pulverulento dado su alto punto de fusión, una escoria fluida y liviana conformada por Óxido Ferroso (FeO) y Sulfuro de Sodio (Na_2S), y emisiones gaseosas de Dióxido de Carbono (CO_2). Dada su importancia, también es necesario que durante la ocurrencia del referido proceso de reducción directa mejorado se tenga un control efectivo en la conformación de la escoria, para lo cual, si se tiene dentro del horno de fundición los minerales concentrados de Molibdenita, se procede a agregarle el Hierro (Fe) como agente reductor y el Carbonato de Sodio (Na_2CO_3) como fundente, precisándose que la utilización de estos insumos metalúrgicos debe hacerse en proporciones estequiométricas tales que, de los productos obtenidos de la reacción química, posteriormente sea posible la regeneración y reciclaje tanto del agente reductor como del fundente. Esto puede lograrse si es que se cuida que la escoria esté principalmente conformada no por tres o más compuestos, sino sólo por dos, y uno de ellos soluble en Agua. En tal sentido, debe propiciarse que la escoria obtenida del Horno de Fundición de extracción de Molibdeno metálico sólo esté conformada por el compuesto insoluble Óxido Ferroso (FeO) y por el compuesto soluble en agua Sulfuro de Sodio (Na_2S), lo cual implica que al mismo tiempo debe tenerse controlada la no formación de Sulfuro Ferroso (FeS) en la escoria para lo cual es necesario que la reacción química del referido proceso principal sea la siguiente:



De conformidad con la termodinámica química, considerando los costos energéticos que implica, la reacción empieza a ocurrir a partir de los 1175°C y debe completarse preferentemente a los 1375°C .

De lo anterior se concluye que en el proceso de reducción directa del Molibdeno a partir del mineral sulfurado que lo contiene, por un lado se tendrá que el número de moles de Carbonato de Sodio (Na_2CO_3), o su equivalente en peso, que debe considerarse como

fundente reaccionante, está en relación directa con los átomos de azufre existentes en la fórmula química de la Molibdenita o Bisulfuro de Molibdeno (MoS_2). Así mismo, el número de átomos gramo de Hierro (Fe), o su equivalente en peso, que será necesario considerar como agente reductor reaccionante en el referido proceso está directamente relacionada con el número de moles gramo de Óxido Ferroso (FeO) que se obtendrá como producto y, como ello depende del número de moles gramo de Oxígeno (O_2) que se liberará como tal en la reacción química, se infiere que lo requerido de átomos gramo de Hierro (Fe) dependerá del número de moles de Carbonato de Sodio (Na_2CO_3) considerados como fundente y, por ende, también del número de átomos de Azufre (S) que contiene el mineral concentrado Molibdenita o Bisulfuro de Molibdenita (MoS_2).

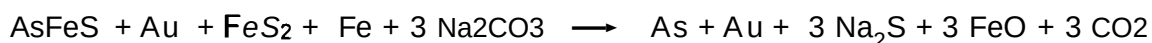
7. Séptimo Ejemplo Preferido: Extracción de Arsénico con Oro y/o Arsénico con Plata mediante la Fundición de concentrados de Arsenopirita Aurífera y/o de Proustita respectivamente.

En el proceso de extracción de los metales Arsénico (As) y Oro (Au) contenidos en la Arsenopirita Aurífera (AsFeS con Au), se tiene la siguiente reacción química:



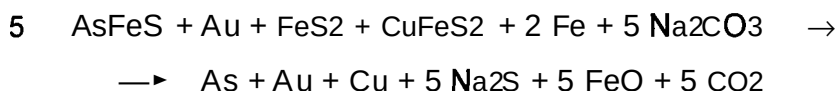
conforme a la termodinámica química, la reacción anterior empieza a ocurrir a partir de 825°C , debiéndose completar la reacción preferentemente a los 1325°C , considerando costos energéticos razonables.

Cuando a la Arsenopirita Aurífera viene asociada a la Pirita (FeS_2), la reacción química anterior debe ser replanteada de la siguiente manera:



De acuerdo a la termodinámica química y considerando los costos energéticos, la reacción anterior empieza a ocurrir a partir de 770°C , debiéndose completar la reacción preferentemente a los 900°C .

Dado que en determinados casos a la Arsenopirita Aurífera no sólo viene asociada la Pirita (FeS_2) sino también la Calcopirita (CuFeS_2), reacción química que corresponde plantear es la siguiente:



Conforme a la termodinámica química, la reacción anterior empieza a ocurrir a partir de 875°C , debiéndose completar la reacción preferentemente a los 975°C considerando
10 costos energéticos razonables, habiéndose verificado que a las condiciones estequiométricas más apropiadas y la temperatura de 1000°C se logra extraer la totalidad del Arsénico contenido en el referido concentrado de Arsenopiritas auríferas.

Respecto de la recuperación del Oro, se tiene que dado el relativamente bajo punto de
15 ebullición del metal Arsénico, se hace imprescindible que en las reacciones anteriores se considere la utilización del metal Plomo como un reactante adicional para que éste sea finalmente el portador del Oro en los productos de la reacción, no solo por la afinidad que existe entre ambos metales, sino también porque en forma conjunta el Plomo con el Oro llegan a conformar el producto metálico fundido de alto peso
20 específico que se separa fácilmente de la escoria constituida por sulfuro de sodio y óxido ferroso para los efectos de realizarse una adecuada colada.

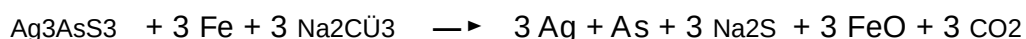
Así mismo, como en los ejemplos preferidos anteriores, para los efectos de tenerse un control efectivo en la conformación de la escoria, se parte de las fórmulas químicas que
25 se tiene establecida para la Arsenopirita (AsFeS), la Pirita (FeS_2) y Calcopirita (CuFeS_2), precisándose que la fundición de los concentrados de estos minerales sulfurados ferrosos conjuntamente con el agente reductor Hierro (Fe) y con el fundente Carbonato de Sodio (Na_2CO_3), deben realizarse considerando las cantidades estequiométricas apropiadas de estos últimos, no sólo para que se obtenga una alta
30 recuperación del Arsénico (As), Oro (Au) y Cobre (Cu), según aplique, sino también para atender la necesidad de que en los procesos subsiguientes, se posibilite la reducción y reciclaje del tanto el agente reductor Hierro (Fe) como del fundente Carbonato de Sodio (Na_2CO_3), lo cual implica que se debe cuidar que la escoria del proceso de extracción de Arsénico (As) y Oro (Au) y/o Cobre (Cu) esté conformada no
35 por tres o más compuestos, sino sólo por dos, por Óxido Ferroso (FeO) y Sulfuro de

Sodio (Na_2S), este último soluble en agua, evitándose en todo momento al Sulfuro Ferroso (FeS) como componente de la escoria. Como tercer producto de las reacciones químicas anteriores se tiene a los efluentes gaseosos de Dióxido de Carbono en las cantidades estequiométricas correspondientes.

5

Para el proceso de extracción de los metales Arsénico (As) y Plata (Ag) contenidos en la Proustita (**AgAsS_3**), se aplica la reacción química general referencial establecida para los minerales sulfurados no ferrosos de dos metales poliatómicos y, en tal sentido, para el referido proceso se tiene la siguiente reacción química:

10



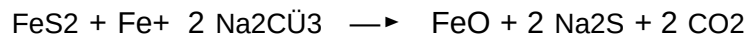
prevaleciendo para todos los efectos los criterios técnicos expuestos anteriormente.

8. Octavo Ejemplo Preferido: Extracción de Hierro mediante la Fundición de 15 concentrados de minerales Sulfurados de Hierro tales como Pirrotita, Piritita y Marcasita.

En este proceso de extracción del metal Hierro (Fe) contenido sus minerales sulfurados tales como, sin limitarse a, Pirrotita (FeS), Piritita y Marcasita (ambos FeS_2), se utiliza en
20 forma apropiada tanto el Hierro (Fe) como facilitador del intercambio atómico si es que el balance estequiométrico de la reacción química lo requiere, así como también el Carbonato de Sodio (Na_2CO_3) como fundente, a fin de que, como producto del proceso, se obtenga una escoria factible de ser colada, la misma que tendrá baja densidad y baja viscosidad debido a que estará conformada por Óxido Ferroso (FeO) y Sulfuro de
25 Sodio (Na_2S), resultando también como un segundo producto las respectivas emisiones gaseosas conformadas por Dióxido de Carbono (CO_2). Así mismo, para los efectos de tenerse un control efectivo en la conformación de la escoria, se parte de las fórmulas químicas que se tienen establecidas para los minerales sulfurados de hierro, como por ejemplo Fe_2S en el caso de la Piritita, precisándose que la fundición de una mol gramo
30 de Piritita con un átomo gramo de Hierro (Fe) y una mol gramo del fundente Carbonato de Sodio (Na_2CO_3) debe realizarse considerando las cantidades estequiométricas apropiadas como para que se logre tener bajo control la composición de la escoria a producirse, de modo que, en los procesos subsiguientes, se posibilite la reducción y reciclaje tanto del fundente Carbonato de Sodio (**Na_2CO_3**) como del Hierro (Fe) que se

debe agregar, en el caso de tenerse bisulfuros de hierro como reaccionante. Esto implica que se tiene que cuidar que la escoria del proceso de extracción de Hierro (Fe) esté conformada, principalmente, no por tres o más compuestos, sino sólo por dos, uno de ellos soluble en Agua (Sulfuro de Sodio), y el otro no (Óxido Ferroso), evitándose la

5 formación del Sulfuro Ferroso (FeS) en la escoria, según la siguiente reacción:

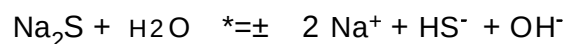


Conforme a la termodinámica química, la reacción anterior ocurre a partir de los 750°C, completándose preferentemente a los 950°C, considerando costos energéticos

10 razonables.

El control sobre la composición de la escoria, permite aprovechar la alta solubilidad del Sulfuro de Sodio (Na₂S) en el Agua (H₂O), para los efectos de tener como único residuo sólido el compuesto Óxido Ferroso (FeO), es indispensable que en el reactor

15 de soluciones se mezcle la escoria, obtenida en el horno de fundición de concentrados de sulfuras de hierro, con la cantidad de Agua líquida necesaria, considerando la solubilidad del Sulfuro de Sodio (Na₂S), de modo que ocurra la siguiente reacción de disociación electroquímica:

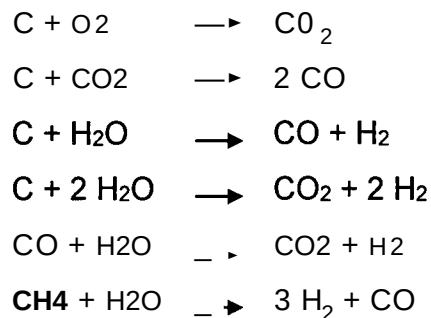


Seguidamente se procede a filtrar la solución resultante y se separar los residuos sólidos conformados únicamente por Óxido Ferroso (FeO). Luego se realiza la aglomeración y posterior sinterización de los referidos residuos sólidos en el respectivo horno, a una temperatura controlada, a fin de que los productos aglomerados de Óxido

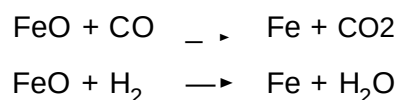
25 Ferroso (FeO), apropiadamente sinterizados y convertidos en "pellets", adquieran la propiedad mecánica de resistencia a la compresión requerida en el interior del Horno de Reducción del Hierro, a donde los "pellets" de FeO serán finalmente enviados. Para lograr la reducción del hierro contenido en los "pellets" de Oxido Ferroso, es necesario que en el Horno de Combustión, donde se generarán los gases reductores (Monóxido

30 de Carbono e Hidrógeno), se disponga del combustible carbón, coque metalúrgico o gas natural insuflándosele tanto el aire y/o vapor de Agua requeridos según sea el caso, como los efluentes gaseosos Dióxido de Carbono (CO₂ residual) y Monóxido de Carbono (CO remanente) reciclados del Horno de Reducción del Hierro, con lo cual, a

una temperatura entre 900°C y 1000°C, ocurren las siguientes reacciones químicas según aplique:



- 5 Los "pellets" sinterizados son introducidos y acumulados en el Horno de Reducción de Hierro, para seguidamente ser sometidos, durante el tiempo necesario, al flujo apropiado de los gases reductores Monóxido de Carbono (CO) e Hidrógeno (H₂) provenientes del Horno de Combustión, con lo cual, el estado de oxidación +2 del Hierro se reducirá a cero, posibilitándose así la extracción del hierro metálico (Fe)
- 10 mediante las siguientes reacciones químicas:



- De lo anterior se concluye que, en un proceso de extracción de Hierro a partir de la Pirita y Marcasita (ambos Bisulfuros de Hierro: FeS₂), Pirrotita (Sulfuro de Hierro: FeS),
- 15 u otros Sulfuras de Hierro, por un lado se tiene que el número de átomos gramo de Hierro (Fe), o su equivalente en peso, que será necesario considerar como reaccionante en el referido proceso, está en relación directa con el número de átomos de Azufre (S) que contenga la Pirita y/o Marcasita (FeS₂), haciéndose la salvedad que deberá deducirse en este cómputo los átomos gramos de Hierro, o su equivalente en
- 20 peso, que estén contenidos en la Pirita y/o Marcasita a fundir. Y, por otro lado, el número de moles de Carbonato de Sodio (**Na₂CO₃**), o su equivalente en peso, que debe considerarse como fundente reaccionante en el proceso de extracción de Hierro, también está en relación directa a la cantidad de átomos de Azufre existentes en la fórmula química de la Pirita y/o Marcasita (Bisulfuros de Hierro: FeS₂). Se precisa que
- 25 en el caso que se quiera fundir una mol gramo de la Pirrotita (FeS), sólo se requerirá una mol gramo de carbonato de sodio como fundente. Es necesario considerar las anteriores precisiones para poder tener control sobre la composición de la escoria, la

misma que deberá estar compuesta por Oxido Ferroso (FeO) y Sulfuro de Sodio (Na₂S). Como un producto adicional en estos casos se obtendrá las emisiones gaseosas de Dióxido de Carbono (CO₂). Como se adelantó anteriormente, un adecuado control sobre la composición de la escoria permite aprovechar la alta solubilidad del Sulfuro de Sodio en el Agua, lo cual, a su vez, posibilita que, luego del correspondiente filtrado se obtenga como único residuo sólido el Oxido Ferroso (FeO), el mismo que será aglomerado y sinterizado para obtener "pellets" de Oxido Ferroso a partir de los cuales se obtiene el Hierro metálico que se planteó extraer a partir de los minerales sulfurados de Hierro.

Referencias:

- (1) Aranguren F. & Mallol A. (1963). Siderurgia, Madrid, Editorial Dossat.
- (2) Aranguren F. & Mallol A. (1963).
- (3) Aranguren F. & Mallol A. (1963).
- (4) Bray J. (1968). Metalurgia Extractiva de los Metales o Férricos, Madrid. Ediciones Interciencia.
- (5) Aranguren F. & Mallol A. (1963).
- (6) Zambrano C. (1988). Apoyo a la puesta en marcha de la Planta de Carbonato de Sodio en solución de Química del Pacífico S.A. Informe de Prácticas. Facultad de Química e Ingeniería Química de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos.
- (7) Choppin G. & Jaffe B. (1970).
- (8) Costa A. (1955). Breve estudio sobre la posibilidad de instalar una Planta de Carbonato de Sodio en el Perú. Tesis de Grado para optar el título de Ingeniero Químico por la Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima.
- (9) Fung C. & Luján R. (1978). Proyecto para la Instalación de una Planta de Carbonato de Sodio en Química del Pacífico S.A. Informe de Prácticas en la Escuela Académico Profesional de Ingeniería Química. Facultad de Química e Ingeniería Química. Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima.
- (10) Zambrano C. (1988).

REVINDICACIONES

1. Un procedimiento para la extracción continua de metales a partir de los minerales sulfurados que los contienen, con o sin hierro asociado, caracterizado por la reducción directa del metal o metales a extraerse, con regeneración y reciclaje del agente reductor hierro y del fundente carbonato de sodio a partir de las escorias y de los efluentes líquidos y gaseosos derivados de los procesos involucrados, en donde el referido procedimiento presenta las siguientes etapas:
- 5
- 10 - **Extracción de metales en el horno de fundición** donde se funden los concentrados de minerales sulfurados ferrosos y/o no ferrosos que contienen al metal a extraerse tales como, sin limitarse a, plomo, plata, zinc, cobre, molibdeno, antimonio, arsénico, con o sin hierro asociado y, con oro y plata como inclusión en determinados casos, utilizándose hierro como agente reductor de los referidos metales no ferrosos y carbonato de sodio como fundente, resultando como
- 15 productos el metal o metales extraídos, fundidos o en estado pulverulento, una escoria controlada, fluida y conformada por óxido ferroso y sulfuro de sodio, y emisiones gaseosas de dióxido de carbono.
- 20 - **Disolución selectiva con agua del componente sulfuro de sodio en la escoria y filtrado de residuos** con el fin de obtener dos productos intermedios, el óxido ferroso sólido y una solución filtrada de sulfuro de sodio.
- 25 - **Regeneración del carbonato de sodio en el reactor de soluciones para su reciclaje**, mediante la mezcla de la solución filtrada de sulfuro de sodio con una solución sobresaturada de carbonato de sodio, insuflándosele a la referida mezcla el efluente gaseoso dióxido de carbono, captado y reciclado del proceso de extracción del metal no ferroso por reducción directa, obteniéndose el carbonato de sodio regenerado y como productos intermedios el gas sulfhídrico y agua.
- 30 - **Eliminación del gas sulfhídrico y obtención del azufre**, mediante la captación y conducción del efluente gaseoso a un reactor sólido/gas, a fin de que reaccione con el óxido de hierro hidratado para la obtención de sulfuro férrico más agua, productos que debidamente aireados se convierten en azufre elemental, agua y el regenerado óxido de hierro hidratado para su reciclaje.
- 35

- 5 - **Sinterización del óxido ferroso**, mediante la previa aglomeración y posterior calentamiento a temperatura controlada entre 1100 y 1300°C de los residuos sólidos obtenidos por filtración, luego disolver parte la escoria, con el fin de obtener pellets de óxido ferroso resistentes a la compresión, propiedad física requerida en la siguiente etapa de regeneración del agente reductor hierro.
- 10 - **Generación de los gases reductores monóxido de carbono e hidrógeno en el horno de combustión** utilizando como combustible carbón o coque metalúrgico o gas natural, proceso que se realiza en el referido horno al que se le insufla el aire y vapor de agua necesarios, conjuntamente con los gases reciclados dióxido de carbono residual y monóxido de carbono remanente, los mismos que se captan del horno de reducción en el que se regenera el agente reductor hierro.
- 15 - **Regeneración del agente reductor hierro para su reciclaje** mediante la reducción del referido metal contenido en el óxido ferroso, residuo derivado de la disolución de la escoria que ha sido aglomerado y sinterizado para una apropiada reacción con los gases reductores monóxido de carbono e hidrógeno generados en el horno de combustión, obteniéndose como producto el hierro metálico para su reciclaje al horno de fundición de concentrados de minerales sulfurados concentrados.
- 20 - **Regeneración del agente reductor hierro para su reciclaje** mediante la reducción del referido metal contenido en el óxido ferroso, residuo derivado de la disolución de la escoria que ha sido aglomerado y sinterizado para una apropiada reacción con los gases reductores monóxido de carbono e hidrógeno generados en el horno de combustión, obteniéndose como producto el hierro metálico para su reciclaje al horno de fundición de concentrados de minerales sulfurados concentrados.
- 25 2. Un método para la extracción de metales comunes y preciosos a partir de los minerales sulfurados ferrosos y/o no ferrosos que los contienen, caracterizado por la fundición de estos en su forma de concentrado del metal o metales a extraerse, tales como, sin limitarse a, plomo, plata, zinc, cobre, molibdeno, antimonio, arsénico, incluyendo oro y/o plata si este estuviese contenido como inclusión en minerales tal como pirita, arsenopirita, calcopirita; utilizando hierro como agente reductor y carbonato de sodio como fundente, resultando como productos el metal o los metales extraídos, fundidos o en estado sólido pulverulento, una escoria controlada, fluida y conformada por óxido ferroso y sulfuro de sodio, y emisiones gaseosas de dióxido de carbono.
- 30 2. Un método para la extracción de metales comunes y preciosos a partir de los minerales sulfurados ferrosos y/o no ferrosos que los contienen, caracterizado por la fundición de estos en su forma de concentrado del metal o metales a extraerse, tales como, sin limitarse a, plomo, plata, zinc, cobre, molibdeno, antimonio, arsénico, incluyendo oro y/o plata si este estuviese contenido como inclusión en minerales tal como pirita, arsenopirita, calcopirita; utilizando hierro como agente reductor y carbonato de sodio como fundente, resultando como productos el metal o los metales extraídos, fundidos o en estado sólido pulverulento, una escoria controlada, fluida y conformada por óxido ferroso y sulfuro de sodio, y emisiones gaseosas de dióxido de carbono.

3. Un procedimiento para la obtención del hierro metálico a partir del procesamiento de las escorias conformadas por óxido ferroso y sulfuro de sodio, caracterizado por:
- La disolución, con agua, del sulfuro de sodio, componente de la escoria.
- 5
- El filtrado del residuo sólido óxido ferroso.
 - La aglomeración y sinterización del óxido ferroso para la formación de pellets de este compuesto.
 - La generación de los gases reductores monóxido de carbono y/o hidrógeno obtenidos en un horno de combustión a partir del carbón o coque metalúrgico o gas natural, conjuntamente con oxígeno, vapor de agua y/o dióxido de carbono.
- 10
- Opcionalmente, podrá prescindirse de este punto en particular, siempre y cuando los gases reductores monóxido de carbono y/o hidrógeno, en lugar de ser generados, sean adquiridos.
- La reducción del hierro contenido en los pellets de óxido ferroso utilizando como
- 15
- agentes reductores los gases monóxido de carbono y/o hidrógeno.
4. Un procedimiento para la obtención de carbonato de sodio a partir del gas dióxido de carbono y de escorias de fundición conformadas por los compuestos óxido ferroso y sulfuro de sodio, caracterizado por:
- La disolución, con agua, del sulfuro de sodio, componente de la escoria.
- 20
- El filtrado y separación de la solución resultante de la disolución del sulfuro de sodio con agua.
 - Procesamiento de la solución filtrada de sulfuro de sodio con el gas dióxido de carbono y una solución sobresaturada de carbonato de sodio.
- 25
- El filtrado y calentamiento de los cristales de bicarbonato de sodio resultantes para su conversión en cristales de carbonato de sodio.
 - La extracción del gas hidrógeno sulfurado, generado en el procesamiento de la solución filtrada de sulfuro de sodio, con el fin de hacerlo reaccionar en un reactor sólido/gas con cristales de óxido de hierro hidratado.
- 30
- La obtención en el reactor sólido/gas de cristales de sulfuro férrico y agua.
 - La aireación de los cristales de sulfuro férrico y agua con el fin de regenerar el óxido de hierro hidratado para su reciclaje y, a la vez, producir azufre elemental y agua.

5. Un método según la reivindicación 2, para la extracción del oro y plata, contenido como inclusión en los minerales sulfurados de hierro y/o, y de la plata, contenida en sus sulfurados, caracterizado por la fundición de los concentrados de los referidos minerales tales como, sin limitarse a, arsenopirita, pirita, marcasita, pirrotita, calcopirita, argentita o acantita, utilizando carbonato de sodio como fundente, hierro como agente reductor en los casos que corresponda y, como agregado adicional, conjuntamente con los reactantes, plomo metálico, portador del oro y la plata en el producto final que se obtiene del proceso de extracción de los referidos metales preciosos.

6. Un proceso para la extracción de hierro metálico a partir de los concentrados de minerales sulfurados de hierro tales como, sin limitarse a, los monosulfuros pirrotita y arsenopirita, los bisulfuros marcasita y pirita, caracterizado por la fundición de estos concentrados utilizando carbonato de sodio como fundente, y hierro adicional como agente reductor en los casos que corresponda, teniendo como resultado la extracción del hierro metálico a partir de las escorias generadas y conformadas por óxido ferroso y sulfuro de sodio, con regeneración y reciclaje de los referidos insumos metalúrgicos, teniéndose las siguientes etapas:

- Fundición de los concentrados de minerales sulfurados de hierro, utilizando carbonato de sodio, como fundente, y hierro adicional, como reductor o reaccionante en los casos que aplique.
- La disolución con agua del componente de la escoria sulfuro de sodio.
- El filtrado del residuo sólido óxido ferroso.
- La aglomeración y sinterización del óxido ferroso para la formación de pellets de este compuesto.
- La generación de los gases reductores monóxido de carbono e hidrógeno obtenidos en un horno de combustión a partir del carbón o coque metalúrgico o gas natural, conjuntamente con oxígeno, vapor de agua y/o dióxido de carbono, suprimiéndose este punto si los gases reductores monóxido de carbono y/o hidrógeno son adquiridos.
- La reducción del hierro contenido en los pellets de óxido ferroso utilizando como agentes reductores los gases monóxido de carbono y/o hidrógeno.

7. Un procedimiento para determinar, en un proceso de reducción directa de metales a partir de los concentrados de minerales sulfurados ferrosos y no ferrosos que

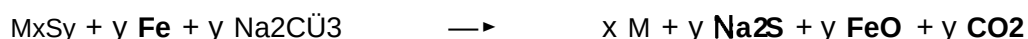
los contienen, las cantidades que son necesarias de hierro como agente reductor y de carbonato de sodio como fundente, para minerales sulfurados no ferrosos de un solo metal, caracterizado por:

- 5 - Establecer el número de átomos gramo de hierro, o su equivalente en peso, requeridos como agente reductor, o facilitador del intercambio atómico entre los reactantes, en el referido proceso de reducción directa de metales, mediante la determinación del número que resulte de sumar todos los átomos de azufre que se encuentren contenidos en la fórmula química de los compuestos mineralógicos
- 10 que contienen el o los metales a extraerse, deduciéndose del mismo el número de átomos gramo de hierro, o su equivalente en peso, que se tenga como componente atómico en los referido compuestos mineralógicos.
- 15 - Establecer el número de moles de carbonato de sodio, o su equivalente en peso, requeridos como fundente en el referido proceso de reducción directa de metales, mediante la determinación del número que resulte de sumar todos los átomos de azufre que encuentren contenidos en la fórmula química de los compuestos mineralógicos que contienen el o los metales a extraerse.
- 20 - Establecer que el número de moles de óxido ferroso, o su equivalente en peso, que se obtiene como producto en la escoria del proceso, es igual al número total de átomos de hierro requeridos como agente reductor entre los reaccionantes del proceso.
- 25 - Establecer que el número de moles, tanto de sulfuro de sodio como de dióxido de carbono, o sus pesos equivalentes, que se obtienen como productos, tanto en la escoria como en el efluente gaseoso del proceso, son iguales al número total de moles de carbonato de sodio requerido como fundente entre los reaccionantes del proceso.
- 30 - Lo anterior aplica para casos en los cuales en el horno de fundición considerado para el proceso, se funden los concentrados de minerales sulfurados que contienen al metal o metales a extraerse, según aplique, para lo cual se utiliza hierro como agente reductor y carbonato de sodio como fundente, resultando
- 35 como productos el metal o metales fundidos o pulverulentos , dependiendo de las

propiedades físicas de los referidos metales y según aplique, una escoria de composición controlada conformada por óxido ferroso y sulfuro de sodio, y emisiones gaseosas de dióxido de carbono. A efectos de tener un control efectivo en la composición de la escoria, lo cual es indispensable para hacer posible la regeneración y reciclaje del agente reductor y del fundente, se establecen las siguientes reacciones generales para los siguientes casos, considerando las siguientes definiciones generales:

- **Fe** es un elemento reactante de estado de oxidación cero, que al ser agregado al reactor principal actúa como agente reductor o como facilitador del intercambio atómico entre el azufre y el sodio, según sea el caso.
- **Na₂CO₃** es un compuesto químico reactante denominado carbonato de sodio, el cual es agregado al reactor principal como fundente.
- **Na₂S** es uno de los componentes de la escoria de nombre sulfuro de sodio obtenido como producto de la reacción química general y es altamente soluble en agua.
- **FeO** es el otro componente de la escoria denominado óxido ferroso, obtenido como producto de la reacción química general y es insoluble en agua.
- **CO₂** es el efluente gaseoso de nombre dióxido de carbono, obtenido como producto de la reacción química general.

Para minerales sulfurados no ferrosos de un solo metal:



Dónde:

- **M** es el metal no ferroso a extraerse tal como, sin limitarse a, plomo, plata, zinc, cobre, molibdeno, antimonio.
- **M_xS_y** es la fórmula química establecida para el mineral sulfurado al que se le va extraer el metal M.
- **x** e **y** indican los números de átomos del metal M a extraerse y del azufre, respectivamente, que existen en M_xS_y, de cuyos valores dependen los coeficientes estequiométricos de los demás reactantes y de los productos que se obtienen en el proceso.

8. Un procedimiento para determinar, en un proceso de reducción directa de metales a partir de los concentrados de minerales sulfurados ferrosos y no ferrosos que

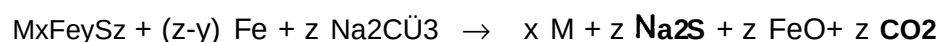
los contienen, las cantidades que son necesarias de hierro como agente reductor y de carbonato de sodio como fundente, para minerales sulfurados ferrosos de un solo metal, caracterizado por:

- 5 - Establecer el número de átomos gramo de hierro, o su equivalente en peso, requeridos como agente reductor, o facilitador del intercambio atómico entre los reactantes, en el referido proceso de reducción directa de metales, mediante la determinación del número que resulte de sumar todos los átomos de azufre que se encuentren contenidos en la fórmula química de los compuestos mineralógicos
- 10 que contienen el o los metales a extraerse, deduciéndose del mismo el número de átomos gramo de hierro, o su equivalente en peso, que se tenga como componente atómico en los referido compuestos mineralógicos.
- 15 - Establecer el número de moles de carbonato de sodio, o su equivalente en peso, requeridos como fundente en el referido proceso de reducción directa de metales, mediante la determinación del número que resulte de sumar todos los átomos de azufre que encuentren contenidos en la fórmula química de los compuestos mineralógicos que contienen el o los metales a extraerse.
- 20 - Establecer que el número de moles de óxido ferroso, o su equivalente en peso, que se obtiene como producto en la escoria del proceso, es igual al número total de átomos de hierro requeridos como agente reductor entre los reaccionantes del proceso.
- 25 - Establecer que el número de moles, tanto de sulfuro de sodio como de dióxido de carbono, o sus pesos equivalentes, que se obtienen como productos, tanto en la escoria como en el efluente gaseoso del proceso, son iguales al número total de moles de carbonato de sodio requerido como fundente entre los reaccionantes del proceso.
- 30 - Lo anterior aplica para casos en los cuales en el horno de fundición considerado para el proceso, se funden los concentrados de minerales sulfurados que contienen al metal o metales a extraerse, según aplique, para lo cual se utiliza hierro como agente reductor y carbonato de sodio como fundente, resultando
- 35 como productos el metal o metales fundidos o pulverulentos , dependiendo de las

propiedades físicas de los referidos metales y según aplique, una escoria de composición controlada conformada por óxido ferroso y sulfuro de sodio, y emisiones gaseosas de dióxido de carbono. A efectos de tener un control efectivo en la composición de la escoria, lo cual es indispensable para hacer posible la regeneración y reciclaje del agente reductor y del fundente, se establecen las siguientes reacciones generales para los siguientes casos, considerando las siguientes definiciones generales:

- **Fe** es un elemento reactante de estado de oxidación cero, que al ser agregado al reactor principal actúa como agente reductor o como facilitador del intercambio atómico entre el azufre y el sodio, según sea el caso.
- **Na₂CO₃** es un compuesto químico reactante denominado carbonato de sodio, el cual es agregado al reactor principal como fundente.
- **Na₂S** es uno de los componentes de la escoria de nombre sulfuro de sodio obtenido como producto de la reacción química general y es altamente soluble en agua.
- **FeO** es el otro componente de la escoria denominado óxido ferroso, obtenido como producto de la reacción química general y es insoluble en agua.
- **CO₂** es el efluente gaseoso de nombre dióxido de carbono, obtenido como producto de la reacción química general.

Para minerales sulfurados ferrosos de un solo metal:



Dónde:

- **M** es el metal no ferroso a extraerse tal como, sin limitarse a, cobre, arsénico, plomo, zinc.
- **MxFe_ySz** es la fórmula química establecida para el mineral sulfurado ferroso al que se le va extraer el metal M.
- **x, y, z** indican los números de átomos del metal M a extraerse, del hierro y del azufre respectivamente, existentes en MxFe_ySz, de cuyos valores dependen los coeficientes estequiométricos de los demás reactantes y de los productos que se obtienen en el proceso.

9. Un procedimiento para determinar, en un proceso de reducción directa de metales a partir de los concentrados de minerales sulfurados ferrosos y no ferrosos que

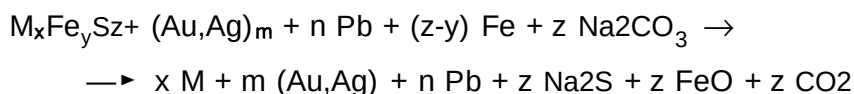
los contienen, las cantidades que son necesarias de hierro como agente reductor y de carbonato de sodio como fundente, para minerales sulfurados de un solo metal, ferrosos y/o no ferrosos, con Oro y/o Plata, caracterizado por:

- 5 - Establecer el número de átomos gramo de hierro, o su equivalente en peso, requeridos como agente reductor, o facilitador del intercambio atómico entre los reactantes, en el referido proceso de reducción directa de metales, mediante la determinación del número que resulte de sumar todos los átomos de azufre que se encuentren contenidos en la fórmula química de los compuestos mineralógicos
- 10 que contienen el o los metales a extraerse, deduciéndose del mismo el número de átomos gramo de hierro, o su equivalente en peso, que se tenga como componente atómico en los referido compuestos mineralógicos.
- 15 - Establecer el número de moles de carbonato de sodio, o su equivalente en peso, requeridos como fundente en el referido proceso de reducción directa de metales, mediante la determinación del número que resulte de sumar todos los átomos de azufre que encuentren contenidos en la fórmula química de los compuestos mineralógicos que contienen el o los metales a extraerse.
- 20 - Establecer que el número de moles de óxido ferroso, o su equivalente en peso, que se obtiene como producto en la escoria del proceso, es igual al número total de átomos de hierro requeridos como agente reductor entre los reaccionantes del proceso.
- 25 - Establecer que el número de moles, tanto de sulfuro de sodio como de dióxido de carbono, o sus pesos equivalentes, que se obtienen como productos, tanto en la escoria como en el efluente gaseoso del proceso, son iguales al número total de moles de carbonato de sodio requerido como fundente entre los reaccionantes del proceso.
- 30 - Lo anterior aplica para casos en los cuales en el horno de fundición considerado para el proceso, se funden los concentrados de minerales sulfurados que contienen al metal o metales a extraerse, según aplique, para lo cual se utiliza hierro como agente reductor y carbonato de sodio como fundente, resultando
- 35 como productos el metal o metales fundidos o pulverulentos , dependiendo de las

propiedades físicas de los referidos metales y según aplique, una escoria de composición controlada conformada por óxido ferroso y sulfuro de sodio, y emisiones gaseosas de dióxido de carbono. A efectos de tener un control efectivo en la composición de la escoria, lo cual es indispensable para hacer posible la regeneración y reciclaje del agente reductor y del fundente, se establecen las siguientes reacciones generales para los siguientes casos, considerando las siguientes definiciones generales:

- **Fe** es un elemento reactante de estado de oxidación cero, que al ser agregado al reactor principal actúa como agente reductor o como facilitador del intercambio atómico entre el azufre y el sodio, según sea el caso.
- **Na₂CO₃** es un compuesto químico reactante denominado carbonato de sodio, el cual es agregado al reactor principal como fundente.
- **Na₂S** es uno de los componentes de la escoria de nombre sulfuro de sodio obtenido como producto de la reacción química general y es altamente soluble en agua.
- **FeO** es el otro componente de la escoria denominado óxido ferroso, obtenido como producto de la reacción química general y es insoluble en agua.
- **CO₂** es el efluente gaseoso de nombre dióxido de carbono, obtenido como producto de la reacción química general.

Para minerales sulfurados de un solo metal, ferrosos y/o no ferrosos, con Oro y/o Plata:



Dónde:

- **M** es el metal no ferroso a extraerse tal como, sin limitarse a, cobre, arsénico, plomo, zinc.
- **M_xFe_yS_z** es la fórmula química establecida para el mineral sulfurado ferroso y no ferroso (para y = 0) al que se le va extraer el metal M y los metales preciosos que se presentan asociados.
- **x, y, z** indican los números de átomos del metal M a extraerse, del hierro y del azufre respectivamente, existentes en M_xFe_yS_z, de cuyos valores dependen los coeficientes estequiométricos de los demás reactantes y de los productos que se obtienen en el proceso.

- **(Au,Ag)_m** representan la inclusiones de Oro (Au), Plata (Ag) y Electrum (Au/Ag) que en un número "m" se presentan dentro de la matriz del mineral $M_xFe_yS_z$.
- **Pb** representa el metal Plomo que en la cantidad "n" se agrega conjuntamente con los reactantes para los efectos de ser el portador final del Oro y la Plata.

5

10. Un procedimiento para determinar, en un proceso de reducción directa de metales a partir de los concentrados de minerales sulfurados ferrosos y no ferrosos que los contienen, las cantidades que son necesarias de hierro como agente reductor y de carbonato de sodio como fundente, para combinaciones de varios minerales sulfurados de un solo metal, ferrosos y/o no ferrosos, caracterizado por:

10

- Establecer el número de átomos gramo de hierro, o su equivalente en peso, requeridos como agente reductor, o facilitador del intercambio atómico entre los reactantes, en el referido proceso de reducción directa de metales, mediante la determinación del número que resulte de sumar todos los átomos de azufre que se encuentren contenidos en la fórmula química de los compuestos mineralógicos que contienen el o los metales a extraerse, deduciéndose del mismo el número de átomos gramo de hierro, o su equivalente en peso, que se tenga como componente atómico en los referido compuestos mineralógicos.

15

20

- Establecer el número de moles de carbonato de sodio, o su equivalente en peso, requeridos como fundente en el referido proceso de reducción directa de metales, mediante la determinación del número que resulte de sumar todos los átomos de azufre que encuentren contenidos en la fórmula química de los compuestos mineralógicos que contienen el o los metales a extraerse.

25

- Establecer que el número de moles de óxido ferroso, o su equivalente en peso, que se obtiene como producto en la escoria del proceso, es igual al número total de átomos de hierro requeridos como agente reductor entre los reaccionantes del proceso.

30

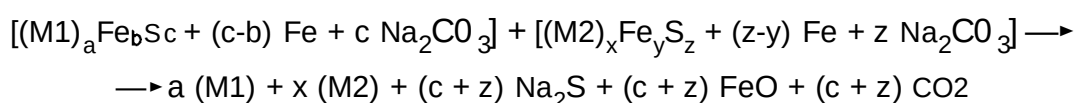
- Establecer que el número de moles, tanto de sulfuro de sodio como de dióxido de carbono, o sus pesos equivalentes, que se obtienen como productos, tanto en la escoria como en el efluente gaseoso del proceso, son iguales al número total de

moles de carbonato de sodio requerido como fundente entre los reaccionantes del proceso.

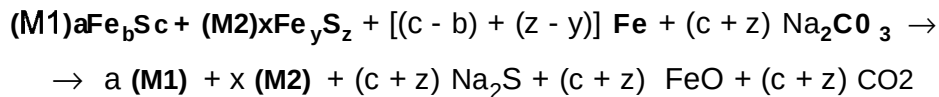
- 5 - Lo anterior aplica para casos en los cuales en el horno de fundición considerado para el proceso, se funden los concentrados de minerales sulfurados que contienen al metal o metales a extraerse, según aplique, para lo cual se utiliza hierro como agente reductor y carbonato de sodio como fundente, resultando como productos el metal o metales fundidos o pulverulentos, dependiendo de las propiedades físicas de los referidos metales y según aplique, una escoria de
10 composición controlada conformada por óxido ferroso y sulfuro de sodio, y emisiones gaseosas de dióxido de carbono. A efectos de tener un control efectivo en la composición de la escoria, lo cual es indispensable para hacer posible la regeneración y reciclaje del agente reductor y del fundente, se establecen las siguientes reacciones generales para los siguientes casos, considerando las
15 siguientes definiciones generales:

- **Fe** es un elemento reactante de estado de oxidación cero, que al ser agregado al reactor principal actúa como agente reductor o como facilitador del intercambio atómico entre el azufre y el sodio, según sea el caso.
- 20 • **Na₂CO₃** es un compuesto químico reactante denominado carbonato de sodio, el cual es agregado al reactor principal como fundente.
- **Na₂S** es uno de los componentes de la escoria de nombre sulfuro de sodio obtenido como producto de la reacción química general y es altamente soluble en agua.
- 25 • **FeO** es el otro componente de la escoria denominado óxido ferroso, obtenido como producto de la reacción química general y es insoluble en agua.
- **CO₂** es el efluente gaseoso de nombre dióxido de carbono, obtenido como producto de la reacción química general.

30 Para combinaciones de varios minerales sulfurados de un solo metal, ferrosos y/o no ferrosos:



35 que expresado de otra forma es igual a:



Dónde:

- 5 - **M1 y M2** son los metales no ferrosos a extraerse tales como, sin limitarse a, cobre, arsénico.
- **(M1)_aFe_bSc** y **(M2)_xFe_yS_z** son las fórmulas químicas establecidas para los minerales sulfurados, ferrosos y/o no ferrosos (para **y = 0**), a los que se le va extraer los metales no ferrosos **M1 y M2**.
- 10 - Los subíndices **a, b, c** así como **x, y, z** indican los números de átomos con los que intervienen tanto los metales **M1 y M2** como el Hierro y el Azufre existentes en **(M1)_aFe_bSc** y **(M2)_xFe_yS_z** respectivamente, de cuyos valores dependen los valores de los coeficientes estequiométricos de los demás reactantes (agente reductor y fundente) y de los productos que se obtienen en el proceso (metales fundidos, escoria y efluente gaseoso).
- 15
11. Un procedimiento para determinar, en un proceso de reducción directa de metales a partir de los concentrados de minerales sulfurados ferrosos y no ferrosos que los contienen, las cantidades que son necesarias de hierro como agente reductor y de carbonato de sodio como fundente, para minerales sulfurados bimetálicos ferrosos y/o no ferrosos, caracterizado por:
- 20
- Establecer el número de átomos gramo de hierro, o su equivalente en peso, requeridos como agente reductor, o facilitador del intercambio atómico entre los reactantes, en el referido proceso de reducción directa de metales, mediante la determinación del número que resulte de sumar todos los átomos de azufre que se encuentren contenidos en la fórmula química de los compuestos mineralógicos que contienen el o los metales a extraerse, deduciéndose del mismo el número de átomos gramo de hierro, o su equivalente en peso, que se tenga como componente atómico en los referido compuestos mineralógicos.
- 25
- Establecer el número de moles de carbonato de sodio, o su equivalente en peso, requeridos como fundente en el referido proceso de reducción directa de metales, mediante la determinación del número que resulte de sumar todos los átomos de
- 30

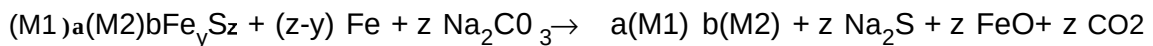
azufre que encuentren contenidos en la fórmula química de los compuestos mineralógicos que contienen el o los metales a extraerse.

- 5
- Establecer que el número de moles de óxido ferroso, o su equivalente en peso, que se obtiene como producto en la escoria del proceso, es igual al número total de átomos de hierro requeridos como agente reductor entre los reaccionantes del proceso.
- 10
- Establecer que el número de moles, tanto de sulfuro de sodio como de dióxido de carbono, o sus pesos equivalentes, que se obtienen como productos, tanto en la escoria como en el efluente gaseoso del proceso, son iguales al número total de moles de carbonato de sodio requerido como fundente entre los reaccionantes del proceso.
- 15
- Lo anterior aplica para casos en los cuales en el horno de fundición considerado para el proceso, se funden los concentrados de minerales sulfurados que contienen al metal o metales a extraerse, según aplique, para lo cual se utiliza hierro como agente reductor y carbonato de sodio como fundente, resultando como productos el metal o metales fundidos o pulverulentos, dependiendo de las
- 20
- propiedades físicas de los referidos metales y según aplique, una escoria de composición controlada conformada por óxido ferroso y sulfuro de sodio, y emisiones gaseosas de dióxido de carbono. A efectos de tener un control efectivo en la composición de la escoria, lo cual es indispensable para hacer posible la regeneración y reciclaje del agente reductor y del fundente, se establecen las
- 25
- siguientes reacciones generales para los siguientes casos, considerando las siguientes definiciones generales:
- Fe es un elemento reactante de estado de oxidación cero, que al ser agregado al reactor principal actúa como agente reductor o como facilitador del intercambio
- 30
- atómico entre el azufre y el sodio, según sea el caso.
- Na_2CO_3 es un compuesto químico reactante denominado carbonato de sodio, el cual es agregado al reactor principal como fundente.
 - **Na₂S** es uno de los componentes de la escoria de nombre sulfuro de sodio obtenido como producto de la reacción química general y es altamente soluble en
- 35
- agua.

- **FeO** es el otro componente de la escoria denominado óxido ferroso, obtenido como producto de la reacción química general y es insoluble en agua.
- **CO₂** es el efluente gaseoso de nombre dióxido de carbono, obtenido como producto de la reacción química general.

5

Para minerales sulfurados bimetalicos ferrosos y/o no ferrosos:



Dónde:

- **M1** y **M2** son los metales no ferroso a extraerse tales como, sin limitarse a, antimonio, zinc, cobre, plata, arsénico, cobalto.
- **(M1)_a(M2)_bFe_yS_z** es la fórmula química establecida para el mineral sulfurado ferroso y/o no ferroso (para y = 0) al que se le va extraer los metales no ferrosos M1 y M2.
- Los subíndices **a**, **b** así como **y**, **z** indican los números de átomos con los que intervienen tanto los metales M1 y M2 como el Hierro y el Azufre, respectivamente, existentes en **(M1)_a(M2)_bFe_yS_z**, de cuyos valores dependen los coeficientes estequiométricos de los demás reactantes (agente reductor y fundente) y de los productos que se obtienen en el proceso (metales fundidos, escoria y efluente gaseoso).

20

12. Un procedimiento para determinar, en un proceso de reducción directa de metales a partir de los concentrados de minerales sulfurados ferrosos y no ferrosos que los contienen, las cantidades que son necesarias de hierro como agente reductor y de carbonato de sodio como fundente, para combinaciones de minerales sulfurados bimetalicos, ferrosos y no ferrosos caracterizado por:

25

- Establecer el número de átomos gramo de hierro, o su equivalente en peso, requeridos como agente reductor, o facilitador del intercambio atómico entre los reactantes, en el referido proceso de reducción directa de metales, mediante la determinación del número que resulte de sumar todos los átomos de azufre que se encuentren contenidos en la fórmula química de los compuestos mineralógicos que contienen el o los metales a extraerse, deduciéndose del mismo el número de átomos gramo de hierro, o su equivalente en peso, que se tenga como componente atómico en los referido compuestos mineralógicos.

30

35

- Establecer el número de moles de carbonato de sodio, o su equivalente en peso, requeridos como fundente en el referido proceso de reducción directa de metales, mediante la determinación del número que resulte de sumar todos los átomos de azufre que encuentren contenidos en la fórmula química de los compuestos mineralógicos que contienen el o los metales a extraerse.

5

- Establecer que el número de moles de óxido ferroso, o su equivalente en peso, que se obtiene como producto en la escoria del proceso, es igual al número total de átomos de hierro requeridos como agente reductor entre los reaccionantes del proceso.

10

- Establecer que el número de moles, tanto de sulfuro de sodio como de dióxido de carbono, o sus pesos equivalentes, que se obtienen como productos, tanto en la escoria como en el efluente gaseoso del proceso, son iguales al número total de moles de carbonato de sodio requerido como fundente entre los reaccionantes del proceso.

15

- Lo anterior aplica para casos en los cuales en el horno de fundición considerado para el proceso, se funden los concentrados de minerales sulfurados que contienen al metal o metales a extraerse, según aplique, para lo cual se utiliza hierro como agente reductor y carbonato de sodio como fundente, resultando como productos el metal o metales fundidos o pulverulentos, dependiendo de las propiedades físicas de los referidos metales y según aplique, una escoria de composición controlada conformada por óxido ferroso y sulfuro de sodio, y emisiones gaseosas de dióxido de carbono. A efectos de tener un control efectivo en la composición de la escoria, lo cual es indispensable para hacer posible la regeneración y reciclaje del agente reductor y del fundente, se establecen las siguientes reacciones generales para los siguientes casos, considerando las siguientes definiciones generales:

20

25

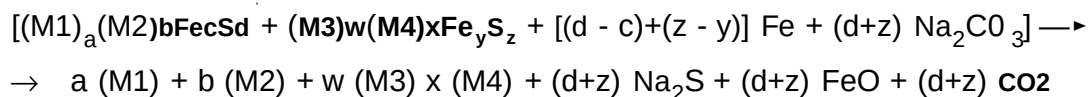
30

- Fe es un elemento reactante de estado de oxidación cero, que al ser agregado al reactor principal actúa como agente reductor o como facilitador del intercambio atómico entre el azufre y el sodio, según sea el caso.
- **Na₂CO₃** es un compuesto químico reactante denominado carbonato de sodio, el cual es agregado al reactor principal como fundente.

35

- **Na₂S** es uno de los componentes de la escoria de nombre sulfuro de sodio obtenido como producto de la reacción química general y es altamente soluble en agua.
- **FeO** es el otro componente de la escoria denominado óxido ferroso, obtenido como producto de la reacción química general y es insoluble en agua.
- **CO₂** es el efluente gaseoso de nombre dióxido de carbono, obtenido como producto de la reacción química general.

Para combinaciones de minerales sulfurados bimetálicos, ferrosos y no ferrosos:



Dónde:

- **M1, M2, M3 y M4** son los metales no ferrosos a extraerse tales como, sin limitarse a, antimonio, zinc, cobre, plata, arsénico, cobalto.
- **(M1)_a(M2)_bFe_cS_d** y **(M3)_w(M4)_xFe_yS_z** son las fórmulas químicas establecidas para minerales sulfurados ferrosos y no ferrosos a los que se les va extraer los metales no ferrosos M1, M2, M3 y M4.
- Los subíndices **a, b, c, d** así como **w, x, y, z** indican los números de átomos con los que intervienen tanto los metales M1, M2, M3 y M4 como el Hierro y el Azufre, respectivamente, existentes en **(M1)_a(M2)_bFe_cS_d** y **(M3)_w(M4)_xFe_yS_z**, de cuyos valores dependen los coeficientes estequiométricos de los demás reactantes (agente reductor y fundente) y de los productos que se obtienen en el proceso (metales fundidos, escoria y efluente gaseoso).

Cabe indicar que la formulación estequiométrica antes indicada tiene validez incluso cuando se presentan alguno (o todos) de los siguientes casos:

- Cuando las fórmulas químicas de los minerales sulfurados bimetálicos contienen un metal no ferroso en común; es decir, cuando (M1, M2) es igual en parte a (M3, M4).
- Cuando en la combinación de los minerales sulfurados bimetálicos, uno de los minerales sulfurados es de tipo ferroso y el otro mineral sulfurado es de tipo no ferroso.

En este sentido, la presencia simultánea de ambos casos arriba expresados presentaría la siguiente formulación estequiométrica, donde $M_4=M_2$, e $y=0$:

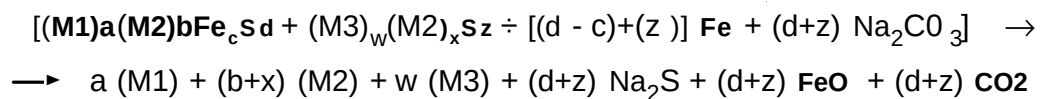


FIGURA 01

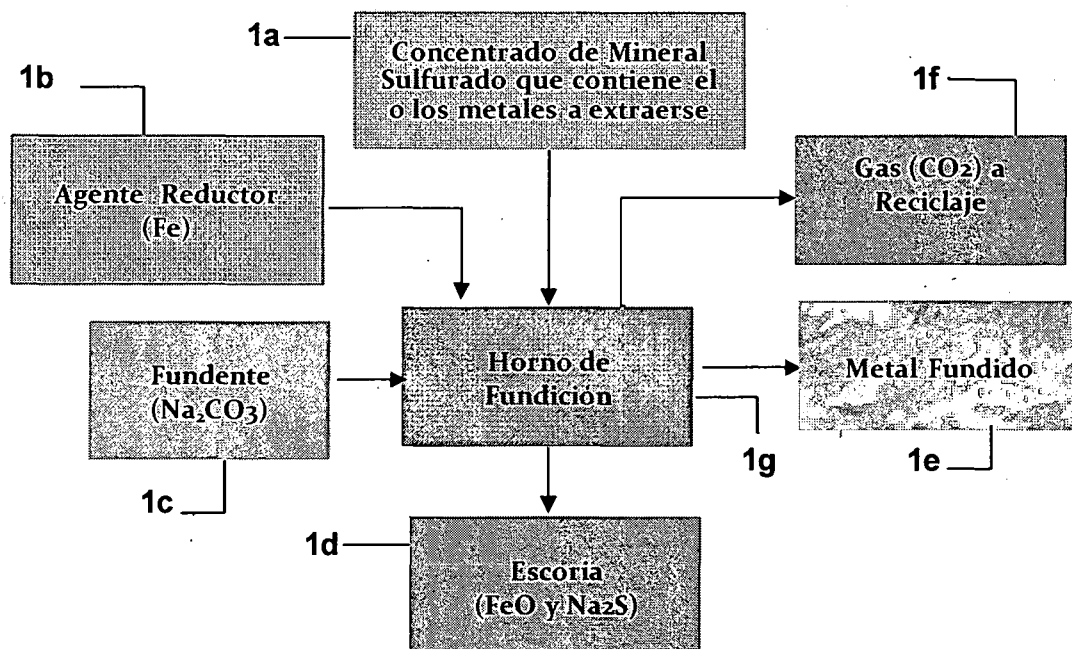


FIGURA 02

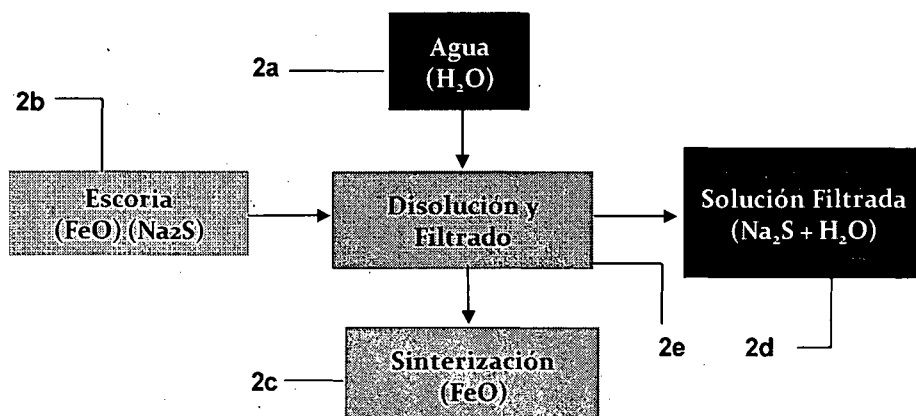


FIGURA 03

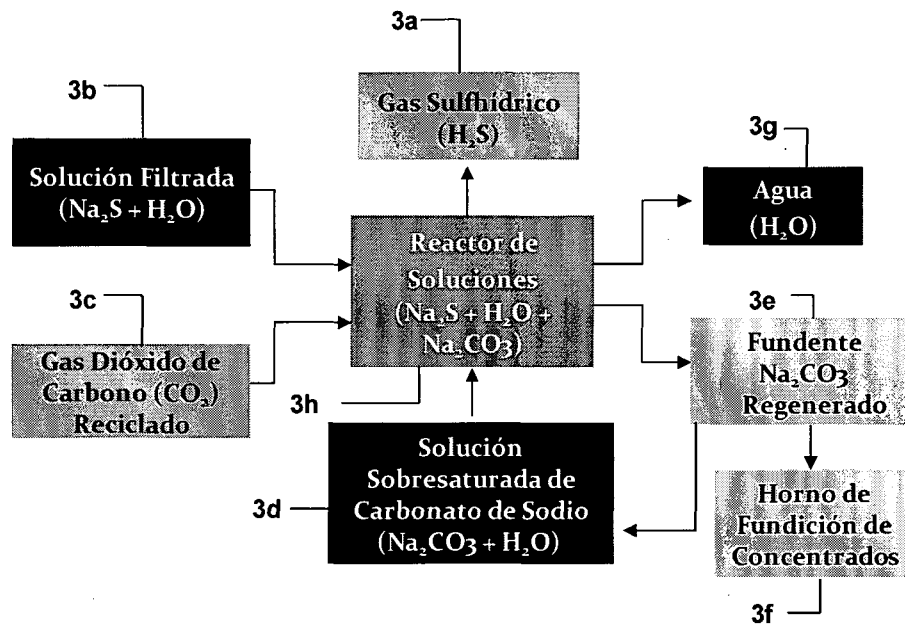


FIGURA 04

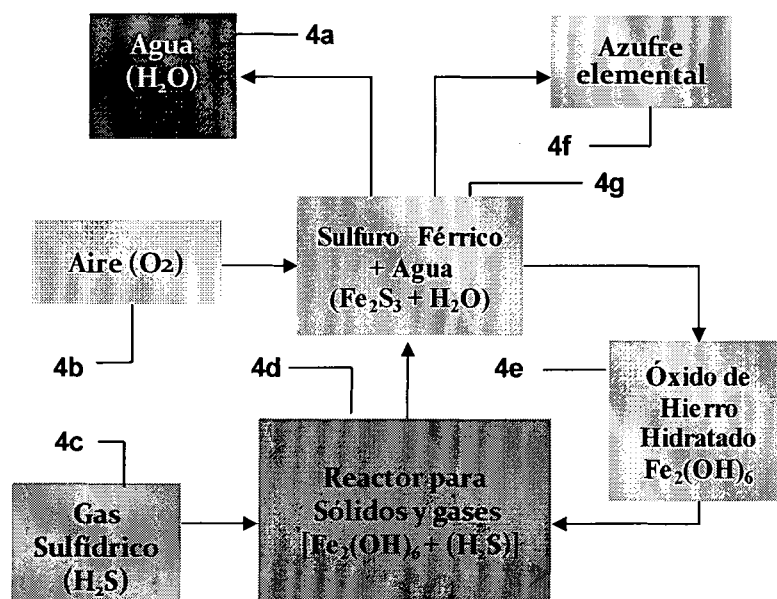


FIGURA 05

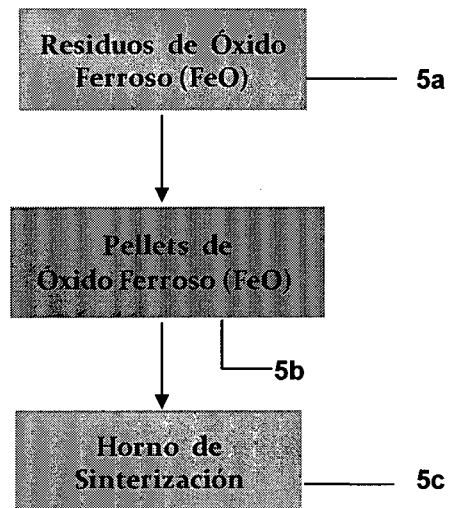


FIGURA 06

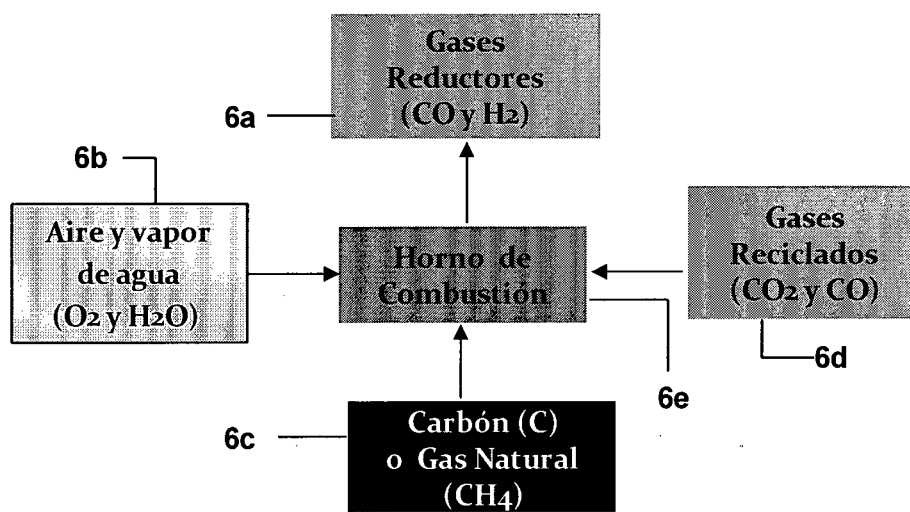


FIGURA 07

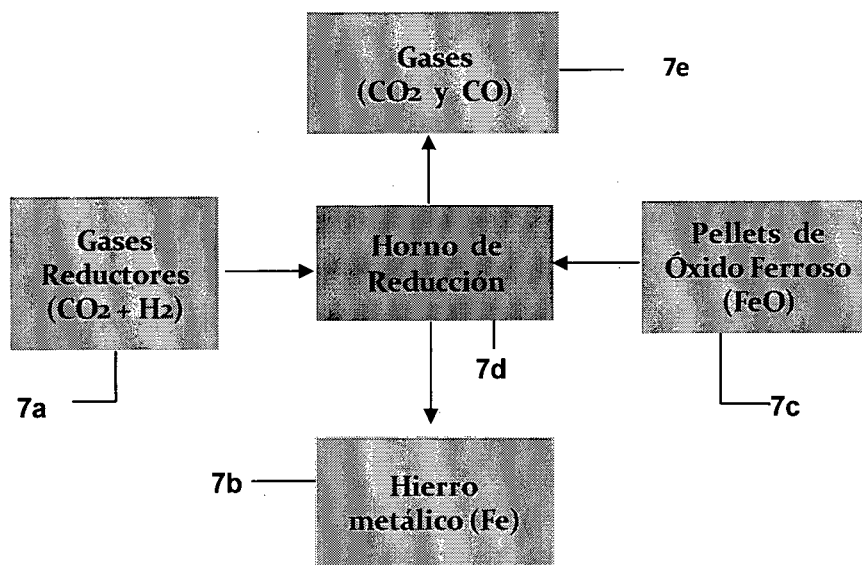
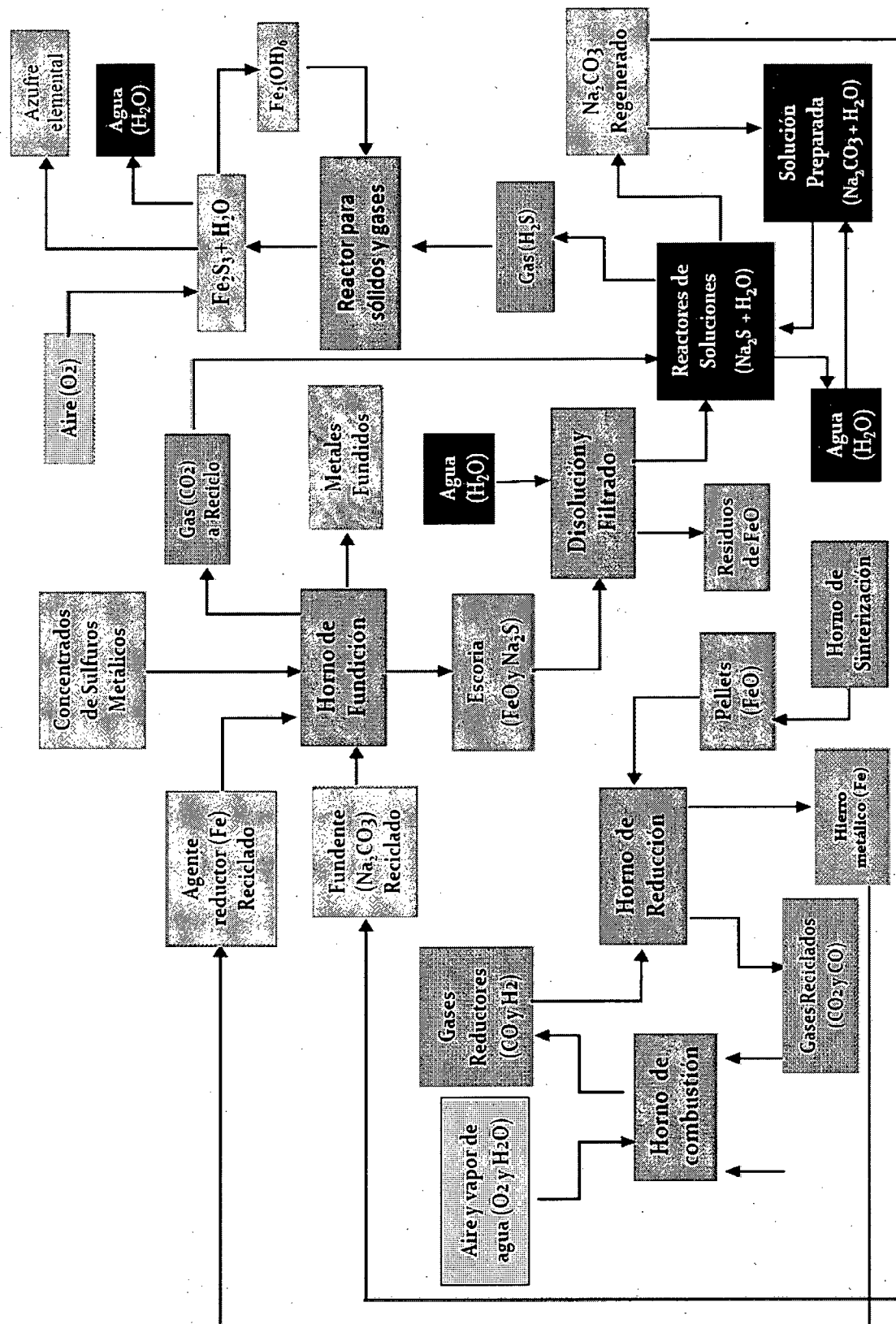


FIGURA 08



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.
PCT/PE2016/000014

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

C22B5/02 (2006.01)

C22B15/00 (2006.01)

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

C22B

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

EPODOC, INVENES, WPI, TXTE, CAPLUS

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	US 5443614 A (LI ET AL.) 22.08.1995, column 4, line 40 - column 7, line 58	1-12
A	US 4101314 A (MORRIS) 18.07.1978, column 5, line 10 - column 8, line 57; figure 4	1-12
A	WO 2004113230 A1 (THE UNIVERSITY OF LEEDS) 29.12.2004, figures 1- 2	1-12
A	US 4162915 A (MAES ET AL.) 31.07.1979, figure 3	1-12

☐ Further documents are listed in the continuation of Box C.

☒ See patent family annex.

* Special categories of cited documents:	"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention
"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance.	
"E" earlier document but published on or after the international filing date	
"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)	"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone
"O" document referring to an oral disclosure use, exhibition, or other means.	"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other documents , such combination being obvious to a person skilled in the art
"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed	"&" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search
03/02/2017

Date of mailing of the international search report
(06/02/2017)

Name and mailing address of the ISA/

Authorized officer
A. Rúa Agüete

OFICINA ESPAÑOLA DE PATENTES Y MARCAS
Paseo de la Castellana, 75 - 28071 Madrid (España)
Facsimile No.: 91 349 53 04

Telephone No. 91 3498518

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

Information on patent family members

PCT/PE20 16/0000 14

Patent document cited in the search report	Publication date	Patent family member(s)	Publication date
US5443614 A	22.08.1995	CA2151791 A1 CA2151791 C	29.01.1996 17.08.1999
-----	-----	-----	-----
US4101314 A	18.07.1978	NONE	
-----	-----	-----	-----
WO20041 13230 A1	29.12.2004	JP2012121798 A JP5603317B B2 US2009311154 A 1 US8834600 B2 ZA200509579 B JP2006527698 A EP1633679 A1 CN1 805903 A CN100567165C C CA2529249 A1 CA2529249 C BRPI0411463 A BRPI04 11463 B1 AU2004249473 A1 AU2004249473B B2	28.06.2012 08.10.2014 17.12.2009 16.09.2014 29.11.2006 07.12.2006 15.03.2006 19.07.2006 09.12.2009 29.12.2004 28.08.2012 07.11.2006 28.06.2016 29.12.2004 19.08.2010
-----	-----	-----	-----
US4162915 A	31.07.1979	SE443156 B SE7709844L L NO773067 A N0153265B B LU81040 A1 LU75732 A1 JPS5331502 A JPS6056219B B2 IT1091153 B GB 1546281 A FR2363634 A1 FR2363634 B 1 DE2739963 A1 DE2739963 C2 CA1084719 A AU2849477 A AU506212B B2	07.03.1978 07.03.1978 07.03.1978 04.11.1985 24.09.1980 27.04.1978 24.03.1978 09.12.1985 26.06.1985 23.05.1979 31.03.1978 11.05.1984 09.03.1978 06.08.1987 02.09.1980 08.03.1979 20.12.1979
-----	-----	-----	-----

INFORME DE BÚSQUEDA INTERNACIONAL

Solicitud internacional n°

PCT/PE2016/000014

A. CLASIFICACIÓN DEL OBJETO DE LA SOLICITUD

C22B5/02 (2006.01)

C22B15/00 (2006.01)

De acuerdo con la Clasificación Internacional de Patentes (CIP) o según la clasificación nacional y CIP.

B. SECTORES COMPRENDIDOS POR LA BÚSQUEDA

Documentación mínima buscada (sistema de clasificación seguido de los símbolos de clasificación)

C22B

Otra documentación consultada, además de la documentación mínima, en la medida en que tales documentos formen parte de los sectores comprendidos por la búsqueda

Bases de datos electrónicas consultadas durante la búsqueda internacional (nombre de la base de datos y, si es posible, términos de búsqueda utilizados)

EPODOC, INVENES, WPI, TXTE, CAPLUS

C. DOCUMENTOS CONSIDERADOS RELEVANTES

Categoría*	Documentos citados, con indicación, si procede, de las partes relevantes	Relevante para las reivindicaciones n°
A	US 5443614 A (LI ET AL.) 22.08.1995, columna 4, línea 40 - columna 7, línea 58	1-12
A	US 4101314 A (MORRIS) 18.07.1978, columna 5, línea 10 - columna 8, línea 57; figura 4	1-12
A	WO 2004113230 A1 (THE UNIVERSITY OF LEEDS) 29.12.2004, figuras 1- 2	1-12
A	US 4162915 A (MAES ET AL.) 31.07.1979, figura 3	1-12

☐ En la continuación del recuadro C se relacionan otros documentos IHI Los documentos de familias de patentes se indican en el anexo

* Categorías especiales de documentos citados:	"T" documento ulterior publicado con posterioridad a la fecha de presentación internacional o de prioridad que no pertenece al estado de la técnica pertinente pero que se cita por permitir la comprensión del principio o teoría que constituye la base de la invención.
"A" documento que define el estado general de la técnica no considerado como particularmente relevante.	
"E" solicitud de patente o patente anterior pero publicada en la fecha de presentación internacional o en fecha posterior.	
"L" documento que puede plantear dudas sobre una reivindicación de prioridad o que se cita para determinar la fecha de publicación de otra cita o por una razón especial (como la indicada).	"X" documento particularmente relevante; la invención reivindicada no puede considerarse nueva o que implique una actividad inventiva por referencia al documento aisladamente considerado.
"O" documento que se refiere a una divulgación oral, a una utilización, a una exposición o a cualquier otro medio.	"Y" documento particularmente relevante; la invención reivindicada no puede considerarse que implique una actividad inventiva cuando el documento se asocia a otro u otros documentos de la misma naturaleza, cuya combinación resulta evidente para un experto en la materia.
"P" documento publicado antes de la fecha de presentación internacional pero con posterioridad a la fecha de prioridad reivindicada.	"&" documento que forma parte de la misma familia de patentes.

Fecha en que se ha concluido efectivamente la búsqueda internacional.
03/02/2017

Fecha de expedición del informe de búsqueda internacional.
06 de febrero de 2017 (06/02/2017)

Nombre y dirección postal de la Administración encargada de la búsqueda internacional
OFICINA ESPAÑOLA DE PATENTES Y MARCAS
Paseo de la Castellana, 75 - 28071 Madrid (España)
N° de fax: 91 349 53 04

Funcionario autorizado
A. Rúa Agüete

N° de teléfono 91 3498518

INFORME DE BÚSQUEDA INTERNACIONAL

Informaciones relativas a los miembros de familias de patentes

Solicitud internacional n°

PCT/PE20 16/0000 14

Documento de patente citado en el informe de búsqueda	Fecha de Publicación	Miembro(s) de la familia de patentes	Fecha de Publicación
US5443614 A	22.08.1995	CA2151791 A1 CA2151791 C	29.01.1996 17.08.1999
-----	-----	-----	-----
US4101314 A	18.07.1978	NINGUNO	
-----	-----	-----	-----
WO20041 13230 A1	29.12.2004	JP2012121798 A JP5603317B B2 US2009311154 A 1 US8834600 B2 ZA200509579 B JP2006527698 A EP1633679 A1 CN1 805903 A CN100567165C C CA2529249 A1 CA2529249 C BRPI0411463 A BRPI04 11463 B1 AU2004249473 A1 AU2004249473B B2	28.06.2012 08.10.2014 17.12.2009 16.09.2014 29.11.2006 07.12.2006 15.03.2006 19.07.2006 09.12.2009 29.12.2004 28.08.2012 07.11.2006 28.06.2016 29.12.2004 19.08.2010
-----	-----	-----	-----
US4162915 A	31.07.1979	SE443156 B SE7709844L L NO773067 A N0153265B B LU81040 A1 LU75732 A1 JPS5331502 A JPS6056219B B2 IT1091153 B GB 1546281 A FR2363634 A1 FR2363634 B 1 DE2739963 A1 DE2739963 C2 CA1084719 A AU2849477 A AU506212B B2	07.03.1978 07.03.1978 07.03.1978 04.11.1985 24.09.1980 27.04.1978 24.03.1978 09.12.1985 26.06.1985 23.05.1979 31.03.1978 11.05.1984 09.03.1978 06.08.1987 02.09.1980 08.03.1979 20.12.1979
-----	-----	-----	-----