

Uso de procesos pirometalúrgicas para la obtención de renio

Use of pyrometallurgical processes for obtaining rhenium

Ivana Orozco¹, Vanesa Bazan²,
Elena Brandaleze³

¹Instituto de Investigaciones Mineras, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de San Juan. Av. Libertador General San Martín 1109 Oeste. San Juan, Argentina.

²CONICET. Instituto de Investigaciones Mineras, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de San Juan. Av. Libertador General San Martín 1109 Oeste. San Juan, Argentina.

³Departamento de Metalurgia, - Facultad de Ingeniería, Universidad Tecnológica Nacional de San Nicolás, Colón 332. CP: B2900LWH - Buenos Aires - Argentina.

iorozco@unsj.edu.ar

bazan@unsj.edu.ar, ebrandaleze@frsn.utn.edu.ar

RESUMEN

El renio es un metal que presenta distintos métodos de obtención. El más utilizado es el que se lleva a cabo por la tostación de la molibdenita. En él se aplican métodos pirometalúrgicos tradicionales como es tostación oxidante, pero también existen métodos pirometalúrgicos innovadores como la tostación con reducción carbotérmica.

En este trabajo se estudia el comportamiento que presenta el renio frente al uso de diferentes tostaciones, ellas son tostación oxidante y tostación con reducción carbotérmica. El objetivo es comparar ambos tratamientos discutiendo los valores de recuperación de renio.

La tostación oxidante es un método que genera importantes emanaciones de SO₂ al medio ambiente, cuando se aplica a sulfuros metálicos. En cambio, la reducción carbotérmica es un proceso que utiliza el CaO como agente captador de azufre y el C como reductor, junto al sulfuro metálico, eliminando de esta manera la contaminación de la atmósfera que había sido producida por el SO₂. Con tal fin, se estudió la relación molar de CaO óptima con respecto al Re y C, requerida para acelerar la velocidad de reducción y controlar la emisión de S a la atmósfera. De esta manera se determinan la dependencia del sulfuro metálico con los factores operacionales de temperatura de tostación, concentraciones molares y tiempos de tostación.

Por otro lado, en la tostación oxidante se trabajó con las variables operativas de temperatura y tiempos de tostación para determinadas condiciones atmosféricas.

En base a los resultados obtenidos de ambas tostaciones se determinaron las condiciones óptimas de las operaciones para la mayor recuperación de Re.

Palabras clave: renio, tostación, reducción carbotérmica.

ABSTRACT

Rhenium is a metal that has different obtainment methods. The most used comes from molybdenite roasting. Traditional pyrometallurgical methods like oxidizing roasting are applied, but there are also innovative pyrometallurgical methods as is roasting with carbothermic reduction.

This paper presents the behavior of rhenium onto two different roasting processes: oxidizing roasting and roasting with carbothermic reduction. The purpose is to compare both treatments discussing rhenium recovery values.

Oxidizing roasting generates several SO₂ emissions towards the environment when it is applied to metal sulphides. The carbothermal reduction is a process that uses CaO as sulfur capturer and C as a reductant agent, and eliminates the atmosphere pollution that would have been caused by SO₂. Thus the

optimum molar ratio of CaO with respect to Re and C, required to accelerate the reduction rate and control S emission to the atmosphere was studied in order to determinate metal sulfide dependence to operational factors of reduction temperature, molar concentrations, roasting times.

Furthermore, the oxidizing roasting was worked out with the operating variables of temperature and roasting time for certain ambient conditions.

Based on the current results for both roasting processes, the optimal operating conditions for the greatest rhenium recover were obtained.

Keywords: rhenium, roasting, reduction carbothermical.

1. INTRODUCCIÓN

Con el avance de las nuevas tecnologías, ha surgido la necesidad de encontrar elementos con propiedades y características prometedoras; un ejemplo de ello es el Renio, este, presenta infinidad de usos y aplicaciones, cumpliendo con los requerimientos buscados por los avances tecnológicos. Se sabe que existen distintos tratamientos que se aplican a los minerales sulfurados portadores de renio para obtener la gran diversidad de productos que se encuentran en el mercado.

El renio es un metal que industrialmente cuenta con distintos métodos de obtención. El más utilizado, es mediante la tostación de la molibdenita. Esto es posible, dado que las propiedades químicas del renio permiten que a temperaturas superiores a los 400 °C hace que volatilice en forma de heptaóxido de renio (Re₂O₇), el cual abandona el horno de tostación junto con los gases de chimenea. Los gases que provienen de los hornos de tostación de molibdenita pasan por ciclones y precipitadores electrostáticos. Luego son enviados a lavadoras de agua, operación que se repite varias veces hasta que la concentración del renio en el agua suba a 10 g/l. Este proceso se denomina actualmente "Proceso Kennecott" siendo el más usado en el mundo. Por lo tanto el mecanismo de obtención del renio en la metalurgia extractiva viene asociado a la producción del molibdeno, siendo él un subproducto del mismo.

Según autores como *PADILLA* [1], para lograr la recuperación de metales presentes en un mineral sulfurado, es necesario aplicar diferentes operaciones en los procesos de extracción. Uno de los procesos sugeridos es la tostación, la cual consiste en hacer reaccionar el mineral con el oxígeno bajo específicas condiciones operacionales de temperaturas y tiempos de tostación. Como resultado se obtienen importantes emanaciones de gases tóxicos como el SO₂, liberado al medio ambiente.

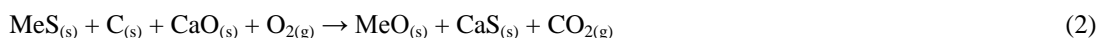
En general, en el caso de la tostación oxidante, según *OROZCO et al* [2] dependiendo de las condiciones en que se efectúe, puede dejar inalterado el sulfuro o formar sulfatos, óxidos o el metal. Esto permite que los sulfuros de metales puedan ser separados por oxidación controlada formando sulfatos y óxidos, posteriormente son separados por fusión o lixiviación. Entonces para un sulfuro que se descompone en condiciones oxidantes, se obtiene un óxido según se observa en la ecuación química 1:



Uno de los problemas de la tostación es la generación de partículas en suspensión acompañadas de gases nocivos como es el SO₂, siendo muy contaminantes para la biosfera. El control en la emisión es demasiado tedioso para el proceso y además costoso. Conjuntamente los procesos pirometalúrgicos tradicionales no son aptos para el tratamiento de la mayoría de estos sulfuros metálicos cuando ellos se encuentren en la forma de concentrados de baja ley, o cuando se encuentren formando depósitos de minerales pequeños o depósitos de sulfuros polimetálicos, (*PADILLA* [1]).

Dado por las altas concentraciones en los valores de contaminación ambiental provocadas por los métodos pirometalúrgicos convencionales, surge el desarrollo de nuevas tecnologías llamadas limpias, como por ejemplo la tostación con reducción carbotérmica. La cual, utiliza un agente reductor apropiado en presencia de un agente desulfurizador, por ejemplo CaO, CaCO₃ o Na₂CO₃, estudiado por *LLOVERAS et al* [3]. El agente reductor es el carbón (C), considerado como un reductor universal.

La reacción global, según lo estudiado por *PADILLA et al* [4], que gobierna la tostación con reducción carbotérmica en presencia de oxígeno se detalla en la ecuación 2. En ella se muestra un agente captador de azufre, siendo el CaO y el agente reductor como el C.



Las ecuaciones químicas 1 y 2 son globales, según autores como *PADILLA et al* [4] el proceso pirometalúrgico de la tostación es muy ordenado desde el punto de vista termodinámico, en conjunto con ello se obtiene un mecanismo de reacción complejo y difícil de controlar operativamente.

En el presente trabajo se estudian dos tostaciones en paralelo, como la tostación oxidante y la reducción carbotérmica. Ambas presentan el mismo fin para la obtención de productos, sin embargo el segundo proceso se ubica en el uso de las tecnologías limpias; debido a que no se liberan ningún tipo de gases contaminantes a la atmósfera. No sucediendo lo mismo para la tostación tradicional, donde según *NUÑEZ et al* [5] la conversión de un sulfuro metálico a un óxido metálico genera una importante liberación de gases con altas concentraciones de SO_2 , el cual es uno de los gases más tóxicos para el medio ambiente.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Caracterización mineralógica y química de las muestras sin tostar

Las muestras en estudio son tres concentrados sulfurados denominados M_1 , M_2 y M_3 , provenientes de flotaciones diferenciales. Se caracterizaron por análisis químicos y mineralógicos.

La composición mineralógica se determinó en muestras sulfuradas mediante técnicas de difracción de rayos X, identificando las fases cristalinas mayoritarias presentes. El equipo utilizado es un difractómetro Philips X Pert WP 1011. El estudio estructural se lleva a cabo por microscopía óptica utilizando un microscopio Olympus GX 51 con analizador de imágenes Leco IA32 y microscopía electrónica de barrido (SEM) y análisis EDS con un equipo FEI Quanta 200.

La composición química, se cuantificó mediante técnicas volumétricas con ataque de digestión ácida y posterior lectura con espectrofotometría de absorción atómica, en el equipo Perkin Elmer PinAAcle 900T y técnicas espectroscópicas de ICP-OES en el equipo Perkin Elmer 7300 DV. La determinación de azufre total, se realizó mediante gravimétrica de precipitación para minerales sulfurados.

2.2 Tostación oxidante y tostación con reducción carbotérmica

La tostación se llevó a cabo en hornos de mufla con crisoles de porcelana con el objetivo de no ingresar interferentes, en cada uno de ellos se pesó 1,00 gr medidos en balanza de precisión de 4 dígitos.

En función de los resultados obtenidos, de los análisis químicos y mineralógicos se diagramaron las tostaciones oxidantes y las reducciones carbotérmicas.

Para la tostación oxidante se analizaron variables de temperatura, pérdidas de masa y tiempos. Se procede de la siguiente manera:

1. - Variación de tiempos comprendidos entre 10, 20, 30, 45, 60, 100 hasta 120 min.
- 2.- Variación de temperaturas de 400 °C a 700 °C, con aumentos progresivos de 100 °C.

Para los ensayos de tostación con reducción carbotérmica se utilizó el mismo concentrado, donde se diagramaron los siguientes ensayos de tostación, los cuales son detallados a continuación:

- 1- Variación de temperatura; fue evaluada desde 300 °C a 700 °C.
- 2- Variación de tiempos; en cada uno de los ensayos anteriores, se corrieron las muestras para los tiempos de 10, 20, 30, 45, 60 hasta 90 min, con un aumento progresivo 50°C.
- 3- Tanto la variación de temperatura como de tiempos se realizaron para la razón molar constante del CaO y del C con respecto al elemento Re (Re:CaO:C), igual a 1:0,5:1.
- 4- Una vez parametrizados las condiciones de tiempo y temperatura se fijan las condiciones operacionales óptimas para las cuales se alcanza las mejores recuperaciones de Re respectivamente, comparando las respuestas entre ambas tostaciones.

2.3 Caracterización química y mineralógica de las muestras tostadas

La caracterización química y mineralógica de los productos obtenidos se obtuvo procediendo de la misma manera que se indica en el ítem anterior.

3. RESULTADOS

3.1 Análisis Mineralógicos

El análisis mineralógico determinó en general que las muestras están compuestas mayormente por molibdenita (MoS_2), la cual se encuentra en gran porcentaje como partículas libres, en cuanto al hierro lo encontramos en menor proporción como pirita (FeS_2) y calcopirita (CuFeS_2). A modo de ejemplo se plasma el análisis de difracción de rayos X correspondiente a la muestra M_3 representado en la Figura 1. Las

muestras M_2 y M_3 repiten el comportamiento observado por este difractograma variando solo la altura de los picos debido a la diferente concentración presente en cada una de las muestras.

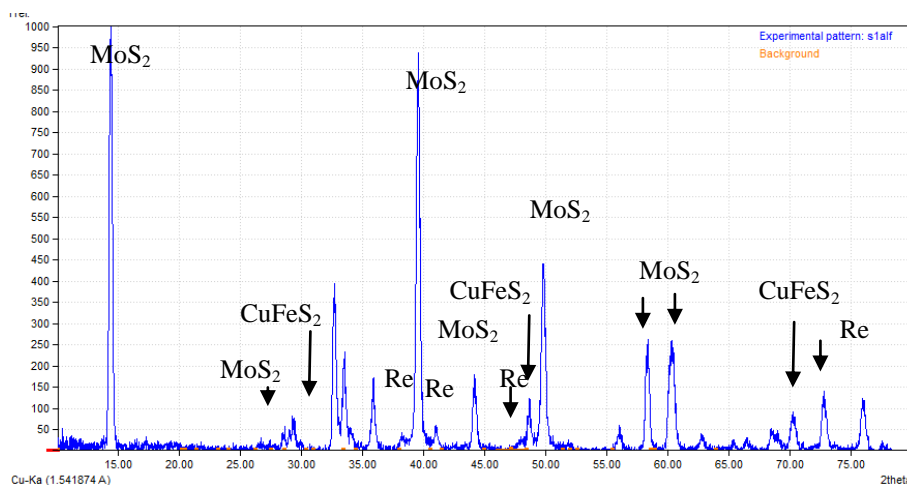


Figura 1: Análisis de DRX del concentrado M_3

El estudio estructural por microscopía óptica (SEM+EDS) para el Re se muestran a continuación en las Figura 2 y Figura 3. En la Tabla 1 se indican sus estructuras cristalinas.

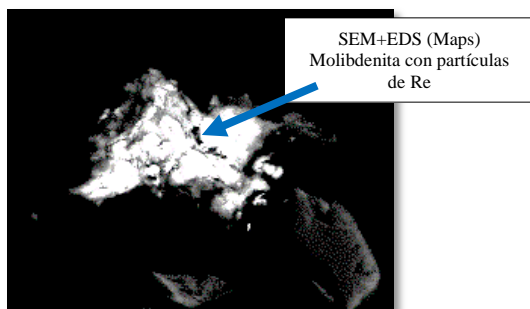


Figura 2: Análisis de SEM/EDS del concentrado M_3

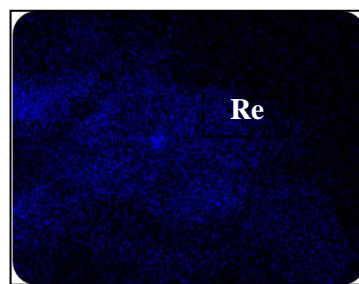


Figura 3: Análisis de SEM/EDS del concentrado M_3

Tabla 1: Estructura cristalina encontrada

Fase	Formula	Estructura Cristalina
Molibdenita	MoS_2	Hexagonal
Renio	Re	Hexagonal

3.2 Análisis Químico

La composición química de las muestras se puede observar en la Tabla 2. Los concentrados obtenidos revelan valores acordes a los esperados de su origen. El elemento de interés es el Re para cada una de las muestras analizadas. Se infiere que los valores de Re son diferentes para M_1 , M_2 y M_3 , siendo un valor ínfimo para M_1 , intermedio para M_2 y alto para M_3 . Sin embargo las composiciones de los elementos Mo, Cu y Fe son notablemente superiores, para cada uno de los concentrados, con respecto a los valores expresados del renio. Presentando una relación aproximada de $Mo/Re = 500/1$.

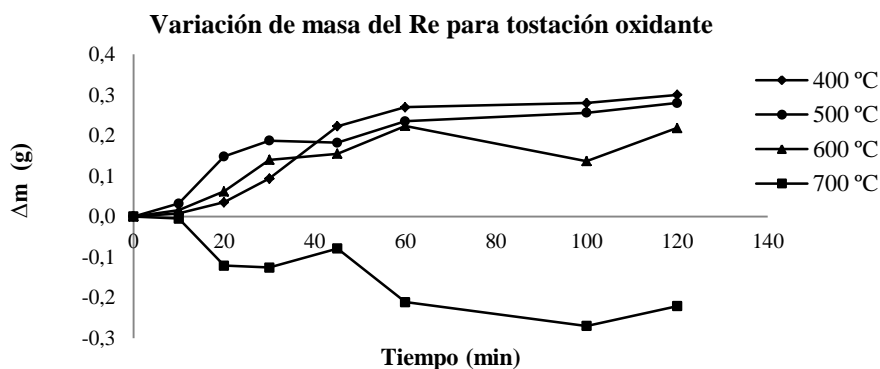
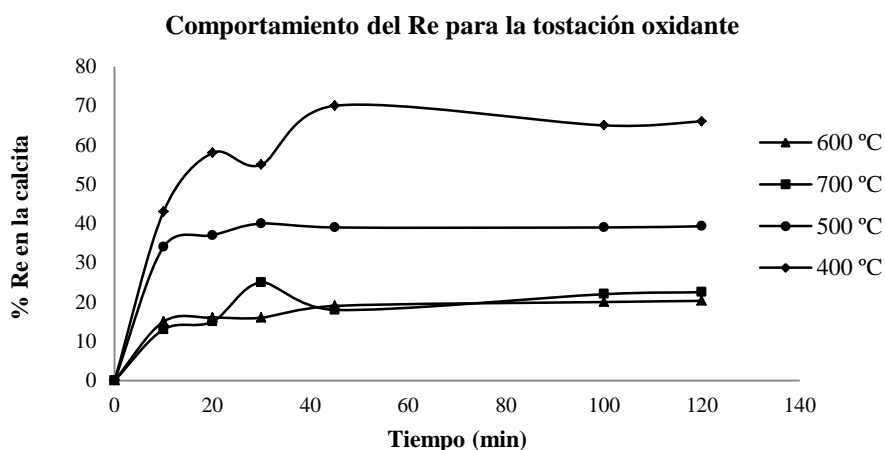
Tabla 2: Análisis químico del concentrado

	Cu	Fe	Re	Mo	Al	Pb	Si	Mn	Ca	Mg	Zn
	ug/g	ug/g	ug/g	ug/g	ug/g	ug/g	ug/g	ug/g	ug/g	ug/g	ug/g
M ₁	141700	66750	3,5	5277	1456	710,4	424,5	153,3	1864	1002	1854
M ₂	92410	50850	495,2	52900	4547	193,7	1744	103,6	2132	1199	949,3
M ₃	9124	13240	1009	52170	4276	N/D	1364	72,9	2567	1557	163,1

3.3 Análisis de variables operativas

3.3.1 Tostación oxidante

En la Figura 4 se observan los resultados de variación de masa para distintos tiempos y temperaturas de tostación oxidante. A continuación, en la Figura 5 se hace referencia a su tasa de oxidación en función del tiempo para distintas temperatura. En la misma se detalla el comportamiento del Re para el concentrado sulfurado M₃ para las condiciones de temperaturas y tiempos citadas anteriormente. Las muestras M₂ y M₃ se comportan de manera similar a la anteriormente expuesta.


Figura 4: Variaciones de masa a diferentes temperaturas para M₃

Figura 5: Comportamiento del Re a diferentes temperaturas para el concentrado M₃

3.3.2 Tostación con reducción carbotérmica

En la Figura 6 se muestra el comportamiento del Re en función de las temperaturas para la tostación con reducción carbotérmica, haciendo referencia a su tasa de oxidación.

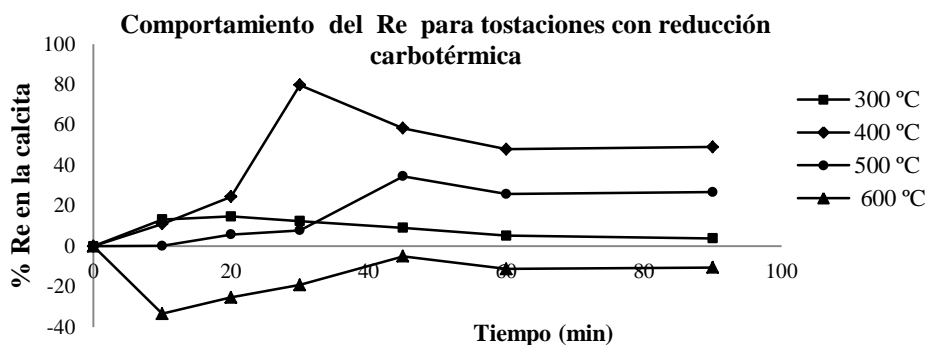


Figura 6: Comportamiento del Re a diferentes temperaturas para el concentrado M₃. Temperaturas desde 300 °C a 600 °C, una relación molar de Re:CaO:C = 1:0,5:1 y tiempo total de 90 min.

Las muestras M₂ y M₃ se comportan de manera similar a la anteriormente expuesta. La cuantificación de masa se planteó con un balance de masa considerando el Re en conjunto con los distintos elementos mayoritarios capaces de oxidarse, tales como el Mo, Fe y Cu.

4. DISCUSIONES

Durante la tostación del concentrado sulfurado como es el sulfuro de renio (ReS₂), conduce a la oxidación del sulfuro de renio a heptaóxido de renio (Re₂O₇), siendo la reacción fuertemente exotérmica y espontánea. Donde el heptaóxido de renio (Re₂O₇) es un compuesto muy volátil, que comienza a volatiliza a partir de los 350 °C. La volatilización del renio ocurre principalmente hacia el final de la eliminación del azufre, y es paralela al inicio de formación de MoO₃, se forma solo a temperaturas sobre 600 °C. A continuación se detallan las discusiones para cada una de las tostaciones estudiadas.

4.1 Tostación Oxidante

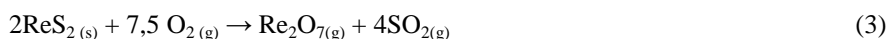
En la Figura 4 se observa que para 400 °C el concentrado presenta una tasa de oxidación progresiva y estable, incrementándose las diferencias de masas justificadas por formaciones de una serie de compuestos. Sin embargo para el resto de las temperaturas se observan comportamientos oscilatorios durante todo el rango de tiempo de tostación. En función de los resultados obtenidos en la Figura 4 se selecciona la temperatura de trabajo de 400 °C y se aplican las tostaciones posteriores a ese valor de temperatura.

Para la tostación oxidante se analizaron las distintas variables tales como temperaturas, tiempos y pérdidas de peso pero aun así los resultados obtenidos no son los esperados en las leyes del Re. Los valores óptimos operaciones para la tostación oxidante son 400 °C y 45 min. Sin embargo la respuesta en los valores de Re en la calcita fue inferior al uso de tostación con reducción carbotérmica.

La Figura 5, muestra el comportamiento del Re específicamente frente a una tostación oxidante para 400 °C a 700 °C, donde se observa como inicialmente existe una disminución en los valores de Re a posteriori lentamente comienza a incrementarse pero en ninguno de los casos supera el valor inicial del Re.

Una justificación a lo visto anteriormente se debe a la formación de compuestos en algunos casos no deseados acompañados de un desprendimiento de partículas en conjunto con el gas liberado disminuyendo de esta manera las concentraciones del metal mencionado, según lo explican autores como EBRAHIMI *et al* [6] y WARCZOK *et al* [7].

La tostación oxidante utilizada comúnmente en este tipo de proceso se basa en oxidar un sulfuro de molibdeno (Mo) que forma un óxido en una atmósfera altamente oxidante, bajo ciertas condiciones de temperatura, generalmente superior a 500 °C. A medida que se forma el óxido de molibdeno conjuntamente se convierte el sulfuro de renio en óxido de renio pero a una temperatura inferior, alrededor de los 400 °C. Entonces para la temperatura de 500 °C se convierte el óxido de molibdeno pero a su vez es liberado a la atmósfera el renio como óxido, recordando que este es muy volátil, según JUNEJA *et al* [8]. Entonces ejemplificando un sulfuro de renio que se descompone según la siguiente reacción química:



Es importante destacar que si bien en este trabajo no se detalla el comportamiento de los otros elementos que constituyen la calcita, se consideró la variación de masa del Re en conjunto con los distintos elemen-

tos mayoritarios capaces de oxidarse, tales como el Mo, Fe y Cu. Según ROGER et al. [9] y DASARY et al [10].

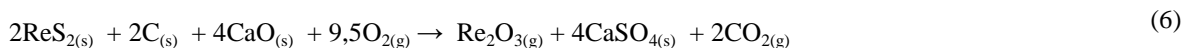
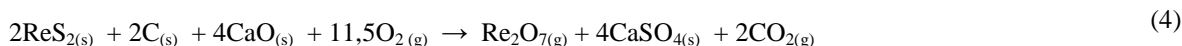
También es importante remarcar la formación de compuestos en paralelo al Re, los cuales se generan en ese rango de temperaturas y tiempo mostrando importantes oscilaciones en los pesos obtenidos. Por ende en función de los resultados obtenidos en la Figura 4 se selecciona la temperatura de trabajo a 400 °C y se aplican las tostaciones posteriores a ese valor de temperatura, dado que el metal de interés indudablemente es el Re.

4.2 Tostación con reducción carbotérmica

En la Figura 6 se observa que la tasa de oxidación es mayor para la temperatura de 400 °C. En cambio para temperaturas superiores a 400 °C las concentraciones de Re disminuyen considerablemente, producto de la formación de los diferentes compuestos del Re para cada temperatura de tostación.

Es importante remarcar la formación de compuestos en paralelo al Re, los cuales se generan en ese rango de temperaturas y tiempo, mostrando importantes oscilaciones en los pesos obtenidos. Por ende en función de los resultados obtenidos en la Figura 6 se selecciona la temperatura de trabajo a 400 °C y se aplican las tostaciones posteriores a ese valor de temperatura, dado que el metal de interés indudablemente es el Re.

Específicamente analizando la tostación para metales como es el Re y si se parte desde el análisis de reacciones químicas podemos inferir que algunas de estas reacciones ocurren en fase sólida, pero en pequeña proporción puesto que la velocidad de difusión de los sólidos es muy baja. Según LLOVERAS et al [3] tales reacciones sólo pueden ocurrir en la interfase de contacto entre las partículas de distintas especies. Para el caso particular del renio y analizando las posibles reacciones químicas involucradas para un proceso de tostación con reducción carbotérmica en presencia de oxígeno, basándose en un software simulador como es el HSC 6.0, son las siguientes:



Según se muestra en la Figura 7 las respectivas energías de Gibbs, obtenidas a partir del software simulador HSC 6.0, la más preponderante es la ecuación química 4. De ello se infiere que la reacción química 4 es más factible que las otras dos. Según lo demuestra el diagrama termodinámico representado en la Figura 7.

Por otro lado, si se analizan en conjunto un diagrama de estabilidad para el sistema Re-S-O y el diagrama de las energías libres de Gibbs, se obtienen que las condiciones óptimas reinantes son coincidentes con las variables operacionales obtenidas a escala de laboratorio. En la Figura 8 se muestra el diagrama de fases para el sistema Re-S-O.

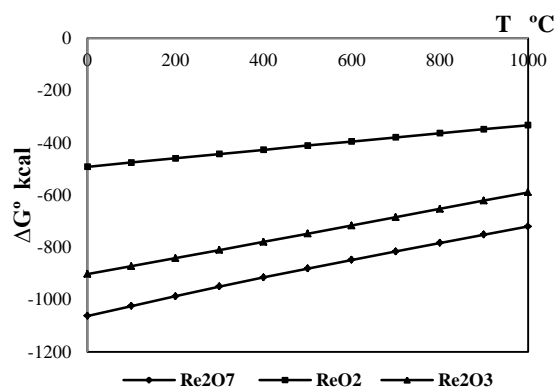


Figura 7: Diagrama de Energía libre de las reacciones versus temperatura.

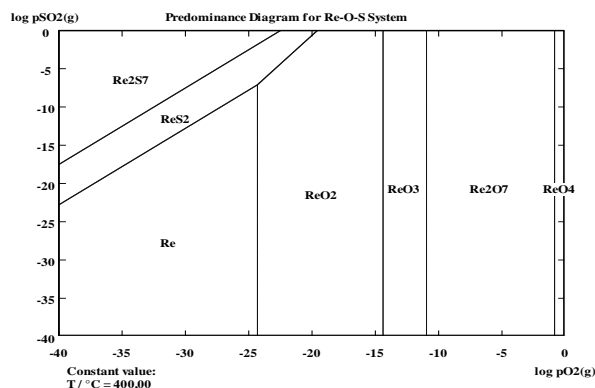


Figura 8: Diagrama de estabilidad del sistema Re-S-O para una presión parcial de pO₂ 0.001

Es importante considerar que si bien en este trabajo no se detalla el comportamiento de los otros elementos que constituyen la calcita, solo se consideró la variación de masa del Re en conjunto con los distintos elementos mayoritarios capaces de oxidarse, tales como el Mo, Fe y Cu. Un autor como ABISHEVA et al [11] estudió su comportamiento.

5. CONCLUSIONES

En este trabajo se concluye que el proceso de tostación es muy ordenado desde el punto de vista termodinámico debido a la secuencia de reacciones químicas que se producen durante la tostación, según lo demuestran los valores de las energías de Gibbs en conjunto con el análisis del diagrama de fases para el sistema Re-S-O.

Es por ello que la alternativa planteada de tostación con reducción carbotérmica de concentrados sulfurados metálicos es una técnica de reducción, cuenta con un gran potencial de uso para la producción de metales a partir de sulfuros, eliminando la contaminación ambiental con gases tóxicos como el SO_2 gracias a la presencia del CaO y obteniendo mejores resultados en los valores de Re que con la tostación oxidante.

Por lo tanto para la tostación con reducción carbotérmica debe analizarse las variables de temperaturas, tiempos, diferencias de pesos y relaciones molares. Es importante destacar que la variable condicionante del proceso de tostación es la temperatura. Donde juega un papel importante durante la reducción directa de sulfuros metálicos. Esto se concluye según se demuestra en los ensayos experimentales presentados, en conjunto con su análisis teórico indican que un aumento en la temperatura incrementa drásticamente la velocidad de reducción, modificando la especie química que se forma para el Renio.

Entonces se concluye que de acuerdo a las variaciones corridas se obtuvieron ternas de datos conformadas por: relación molar; temperatura y tiempo. Se determinó que las condiciones óptimas operacionales fueron de: relación molar de 1:0,5:1 con respecto al Re, temperatura de trabajo correspondiente a los 400 °C y un tiempo óptimo de tostación de 30 minutos. Para temperaturas superiores a los 500 °C se produce la volatilización del metal Re como óxido, bajo la forma de Re_2O_7 , para ambas tostaciones el comportamiento es el mismo.

El C interviene en la reacción expuesta en la ecuación 4 como captador del oxígeno, mientras que el CaO es un importante componente de la reacción para la obtención del Re_2O_3 , ya que la función del CaO es de retener al azufre. Esto hace pensar que el uso de una cantidad de CaO mayor al estequiométrico no incide mayormente en la velocidad de reducción de los sulfuros analizados mientras que el uso de carbón en exceso es necesario para tener una cinética rápida.

Para la tostación oxidante se puede decir que dependiendo de las condiciones en que se efectúe, puede dejar inalterado el sulfuro o formar sulfatos, óxidos o el metal. Esto permite que dos sulfuros de metales puedan ser separados por oxidación controlada formando sulfatos y óxidos. Lo cual en este trabajo se concluye que para mejorar la recuperación de Re, usando tostación oxidante, la variable operacional más importante es la temperatura. La temperatura óptima de operación es de 400 °C, con esa condición el renio queda retenido en la calcita. Para temperaturas superiores a ella, se obtienen recuperaciones inferiores de Re, es decir se produce la volatilización del mismo. Siendo coincidente este comportamiento para las tostaciones con reducción carbotérmica.

Otra variable a tener en cuenta en ambos procesos de tostación muy importante es de separar el molibdeno del cobre y hierro previo al proceso de tostación para poder mejorar la recuperación deseada, la cual se planteara en un trabajo a posteriori. Pero se debe considerar dado que existe en la muestra una importante concentración de molibdeno y cobre, las reacciones de formación de molibdatos entre cobre y trióxido de molibdeno está restringido por el área superficial directa de contacto; característico de las reacciones sólido-sólido. No obstante, la reacción entre óxidos básicos y el vapor de trióxido de molibdeno, no está restringida y puede correr en forma rápida. También llevándose con el renio.

6. BIBLIOGRAFÍA

- [1] PADILLAR R. "Reducción carbotérmica de sulfuros metálicos", *Revista del Instituto de Investigaciones de la Facultad de Geología, Minas, Metalurgia, y Ciencias Geográficas*, v.5, n. 9, pp 59-65, Ene. 2002.
- [2] OROZCO I., BAZÁN V., DIAZ A, P. SARQUIS. "Reducción carbotérmica de minerales sulfurados". In: *11° Congreso Binacional de Metalurgia y Materiales. SAM / CONAMET*, pp 123-130, Rosario-Argentina, Octubre 2011.

- [3] LOVERA D, NÚÑEZ J, PABLO, ZEGARRA N, J. “Reducción carbotérmica de la calcopirita sin emisión contaminante”. *Revista del Instituto de Investigaciones de la Facultad de Geología, Minas, Metalurgia, y Ciencias Geográficas*, v.3, n. 5, pp. 07-12, Junio 2000.
- [4] PADILLA R, RUIZ M. C., SOHN H. Y. "Reduction of molybdenite with carbon in the presence of lime". *Metallurgical and Materials Transaction*, v. 28, n. 2, pp 265-274, Feb 1997.
- [5] NUÑEZ P., ZEGARRA J., PUENTE L. “Reducción carbotérmica de la calcopirita sin emisión contaminante”. *Revista del Instituto de Investigaciones Facultad de Geología, Minas, Metalurgia, y Ciencias Geográficas*, v. 3, n. 5, pp 70-82, Enero 2000.
- [6] EBRAHIMI K., HASAN M., SAIDI A. “Mechanochemical effects on the molybdenite roasting kinetics”. *Chemical Engineering Journal*, v. 121, n. 2, pp 75-61, Agosto 2006.
- [7] WARCZOKA., RIVEROSC., UTIGARD F., MARIN T..Tesis: “*Determinación de las condiciones de tostación de concentrados de molibdenita*”. Grado Msc. Universidad de Concepción Chile, Concepción 2005.
- [8] JUNEJA J.M., SINGH SOHAN, BOSE D.K. “Investigations on the extraction of molybdenum and rhenium values from low grade molybdenite concentrate”, *Hydrometallurgy*, v. 41, n. 2, pp 201-209, Junio 1996.
- [9] ROGER J., AUDUBERT F., PETITCORPS Y. “Thermal reaction of SiC films with Mo, Re and Mo–Re alloy”, *Journal of Alloys and Compounds*, v. 475, n. 2, pp 635-642, Mayo 2009.
- [10] DASARY R. M., SHAIENDRA K. V. “Short-term oxidation response of Nb–15Re–15Si–10Cr–20Mo alloy”, *Journal of Materials Research and Technolog*, v. 3, n. 2, pp 25–34, Enero 2014.
- [11] ABISHEVA Z.S., ZAGORODNYAYA A.N., BEKTURGANOV N.S. “Review of technologies for rhenium recovery from mineral raw materials in Kazakhstan”, *Hydrometallurgy*, v. 109, n. 1, pp 1–8, Septiembre 2011.
- [12] SCOTT’S W., *Standard Methods of Chemical Analysis*. 5 ed., New York, N. H. Furman, 1939.