

UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
Facultad de Ingeniería
Departamento de Ingeniería Metalúrgica

Profesores Patrocinantes
Rafael Padilla Duran
María Ruiz Paredes

VOLATILIZACIÓN DE ARSENICO Y ANTIMONIO DESDE UN CONCENTRADO DE COBRE POR CLORURACIÓN



GALO FELIPE BRITO CRISÓSTOMO

Informe de Memoria de Título
Para optar al Título de

Ingeniero Civil Metalúrgico

Noviembre 2017

AGRADECIMIENTOS

A mis padres Galo y Carmen, por su apoyo incondicional y fraterno durante estos largos años fuera de casa, su tiempo, dedicación y consejos. Por haber entregado amor hasta el cansancio, solo los 3 sabemos el sacrificio que significó para nosotros mi paso por la universidad y es por eso que este trabajo es el fruto de un esfuerzo mancomunado.

A mi hermano Diego, por el cariño que me ha entregado toda su vida, sobretodo este último años que compartimos juntos en Concepción viviendo nuestra vida universitaria, espero que esta experiencia haya sido tan enriquecedora para ti, como lo fue para mí.

A mi abuelo Pedro Manuel Ángel, su sabiduría es un tesoro de incalculable valor para mí, y es por eso que doy gracias a Dios que la salud le permita acompañarme hasta este día.

Agradecer también, a mi polola Katy Leal, por su amor, gracias por impulsarme siempre a ser mejor persona, agradecer de igual forma a su familia por el apoyo entregado durante el tiempo que hemos estado juntos.

A mis amigos Tomás, Kakin, Cecilia y Sca, mi familia en Concepción, por su preocupación y largos años de amistad, los infaltables almuerzos juntos, que fueron un escape a las rutinas que cada uno de nosotros debía cumplir a diario.

A mis compañeros de colegio, hoy y siempre los he sentido cerca, y a pesar que el destino separó nuestros caminos, que alguna vez se reunieron en las salas de clases del Instituto Santa María, nuestra amistad ha podido superar esa barrera, solo por nombrar a algunos, a mis amigos Héctor, Fernando, Cristian, Felipe y Diego. Y a mis queridas compañeras, Carolina, Camila, Doris, Jessica y Natalia.

A mis cachorras Claudia, María Pía y Carla, por su cariño, por soportar mi flojera, bromas pesadas, y por ayudarme en tantos trabajos. Siempre tuvieron una sonrisa, gracias por tanto y perdón por tan poco. Mención especial a Claudia y su familia por adoptarme estos 6 años.

A mis amigos Fabián, Nelson Danor, Juan Pablo y Oscar por entregar su amistad, alegría y buena onda a diario, compartir tantas vigiliass y estudios de última hora, que hoy me permiten presentar este trabajo.

A mi amigo Nestor, por su apoyo en los buenos y malos momentos, a mi amiga Dagmar por los lluviosos miércoles almorzados y a Maria Jesus por sus largos años de amistad.

Agradecer encarecidamente al profesor Rafael Padilla Duran, por ser un excelente docente, que despertó particularmente mi interés por la termodinámica, siempre de manera rigurosa. Además de permitirme trabajar en calidad de alumno memorista en unos de sus proyectos, fue un placer trabajar bajo el alero de un gran investigador como él.

Finalmente, agradecer a Dios, por poner en mi camino, amigos mucho mejores de los que merezco.

En memoria de Esledina Zapata Urrutia y Mao Juan Brito Solar

Resumen

Arsénico, antimonio y bismuto son impurezas que se encuentran en algunos concentrados de cobre, constituyendo minerales como la enargita (Cu_3AsS_4), tenantita ($\text{Cu}_{12}\text{As}_4\text{S}_{13}$), antimonita (Sb_2S_3) y bismutina (Bi_2S_3). Estas impurezas son tóxicas por lo cual deben ser eliminadas desde concentrados de cobre.

Este es el caso de la División Ministro Hales de Codelco, en el cual sus concentrados presentan altos niveles de arsénico, mucho mayores a 0.5%, límite que la mayoría de las fundiciones ha puesto para sus concentrados, aunque algunos autores creen que este límite podría en el futuro cercano llegar a 0.3%.

La atención más reciente está puesta en alternativas pirometalúrgicas y es bajo esta línea de investigación que se presenta este trabajo de memoria de título que se desarrolló en el marco del Proyecto FONDECYT # 1150339.

En este trabajo se estudió la cloruración de un concentrado industrial proveniente de la División Ministro Hales (CODELCO), con cloruro de calcio a temperaturas de 450-600°C, realizando pruebas a tiempos fijos en un horno horizontal, utilizando diversas mezclas de concentrado/cloruro de calcio y diversas composiciones de gases para insuflar al horno.

Los resultados obtenidos en este trabajo, indican que una mezcla clorurada puede perder hasta un 14% de su peso, a 600°C y bajo una atmósfera de 5% oxígeno, correspondiente a la volatilización de los minerales principales en el concentrado que contienen arsénico y antimonio. Estos resultados indican que antimonio puede ser volatilizado sobre 99% a 600°C en una atmósfera 5% de oxígeno.

Abstract

Arsenic, antimony and bismuth are impurities that are present in some copper concentrates. These elements are present as sulfide minerals such as enargite (Cu_3AsS_4), tennantite ($\text{Cu}_{12}\text{As}_4\text{S}_{13}$), antimonite (Sb_2S_3) and bismuthinite (Bi_2S_3). Since these impurities are toxic, they must be removed from the copper concentrates.

This is the situation of Ministro Hales Mining Division (CODELCO), where the concentrates show high levels of arsenic, higher than 0.5%, which is the limit that most smelters have established for their concentrates. However, it is believed by some authors that this limit could be reduced to 0.3% in the near future.

Recently, the attention has been set on pyrometallurgical alternatives and this study is in the same line of investigation under the framework of a FONDECYT Project # 1150339.

This research is about the chloridizing of a concentrate Ministro Hales Mining Division with calcium chloride in the temperature range of 450 to 600°C. Tests were done at fixed times in a horizontal furnace, using different mixtures of calcium chloride-concentrate and several oxidizing gas compositions.

The results obtained in this research state that a sample mixture exposed to a temperature of 600°C and under an atmosphere of 5% of oxygen could lose until 14% of his weight, corresponding to the volatilization of the major minerals of the concentrate containing arsenic and antimony. The results indicate also that Sb can be volatilized to about 99% at 600 °C in 5% oxygen in the gas phase.

Contenido

1. Introducción	1
1.1 Introducción.....	1
2. Antecedentes	3
2.1 Antecedentes Generales	3
2.8 Reacciones de Enargita y Antimonita a alta temperatura.	7
3. Desarrollo experimental	10
3.1 Equipos	10
3.2 Minerales y reactivos	11
3.3 Preparación de muestras de concentrado-cloruro de calcio.	13
3.4 Procedimiento experimental	13
4. Resultados y discusiones	15
4.1 Pruebas preliminares.....	15
4.2 Efecto de la temperatura en la pérdida de peso y volatilización de impurezas en oxidación y cloruración de concentrado de cobre	15
4.3 Efecto de la presión parcial de oxígeno en volatilización clorurante.....	19
4.4 Caracterización de las calcinas por DRX	20
5. Conclusiones	25
6. Bibliografía	26
7. Anexos	28
7.1 Datos para construir figuras	28
7.2 Otros difractogramas adicionales.	32

Indice de figuras

Figura 1. Diagrama de equipo de cloruración de concentrados	10
Figura 2. Resultado análisis granulométrico laser	11
Figura 3. Difractograma del concentrado MH.....	12
Figura 4. Perfil térmico horno horizontal (el origen corresponde a un extremo del horno) ..	14
Figura 5. Porcentaje pérdida de peso de M2 a 500°C y 10% O2.....	15
Figura 6. Volatilización de antimonio para la muestra MH y mezcla M1 con 5% O2.....	16
Figura 7. Efecto de temperatura en el porcentaje pérdida de peso de la mezcla MH.....	17
Figura 8. Efecto de la temperatura en la pérdida de peso de la mezcla M1	18
Figura 9. Efecto de temperatura en el porcentaje pérdida de peso para la mezcla M2	19
Figura 10. Efecto de la presión parcial de O2 para la mezcla M1. Temperatura = 600°C	20
Figura 11. Difractograma de la mezcla M1 obtenida a 2 min. En 5% O2 a 600°C.....	21
Figura 12. Difractograma de la mezcla M1 obtenida a 10 min. En 5% O2 a 600°C.....	22
Figura 13. Difractograma de la mezcla M1 obtenida a 5 min. En 1% O2 a 600°C.....	23
Figura 14. Difractograma de la mezcla M1 obtenida a 5 min. En 10% O2 a 600°C.....	23
Figura 15. Difractograma de la mezcla M1 obtenida a 20 min. En 1% O2 a 600°C.....	32
Figura 16. Difractograma de la mezcla M1 obtenida a 10 min. En 5% O2 a 600°C.....	32



Indice de tablas

Tabla 1. Propiedades físicas de la Enargita	3
Tabla 2. Propiedades físicas del Arsénico	4
Tabla 3. Propiedades físicas de la Antimonita	5
Tabla 4. Propiedades físicas del Antimonio	6
Tabla 5. Composición química concentrado industrial MH.....	12
Tabla 6. Perfil térmico horno horizontal	28
Tabla 7. Datos para construir Figura 5.....	29
Tabla 8. Datos para construir Figura 6.....	29
Tabla 9. Datos para construir Figura 7.....	30
Tabla 10. Datos para construir Figura 8.....	30
Tabla 11. Datos para construir Figura 9.....	31
Tabla 12. Datos para construir figura 10.....	31



1. Introducción

1.1 Introducción

Cerca de un 70% de la producción mundial de cobre metálico se obtiene desde minerales sulfurados de cobre mediante la vía de concentración, fusión de concentrado, conversión y posterior electrorrefinación.

Estos minerales sulfurados pasan primero por una etapa de conminución para liberar las especies minerales de cobres allí presentes, posteriormente los minerales de interés son concentrados mediante flotación. Este concentrado es secado y fundido para producir una fase rica en cobre, denominada eje o mate, una escoria y una fase gaseosa rica en SO_2 . Luego mediante el proceso de conversión el mate es transformado en cobre blíster, el cual es posteriormente refinado a fuego antes de transformarlo en ánodos. Finalmente los ánodos son electrorrefinados para producir cátodos de cobre metálico con una pureza de 99.99%.

Los depósitos de sulfuros de cobre se han vuelto progresivamente más complejos, [9] esto involucra la aparición de menas con contenidos atractivos de cobre, pero con contenidos altos de arsénico y otras impurezas como antimonio y bismuto. El arsénico en algunos concentrados de cobre puede llegar a valores del orden de 1%, lo que hace que no puedan ser procesados directamente por la vía tradicional de fusión-conversión. En el caso de DMH, sus concentrados alcanzan niveles de 3.5-5% de arsénico.

Este problema ha despertado un gran interés en el desarrollo de tecnologías que permitan el pretratamiento de estos concentrados impuros, debido a que actualmente no es posible alcanzar niveles adecuados de impurezas como antimonio, bismuto y arsénico, lo cual devalúa el concentrado, la penalización actual es del orden de 2.5-3 USD/kg de arsénico para concentrados sobre 0.2% de arsénico, [1] estos concentrados ricos en arsénico conllevan serios problemas ambientales

Aunque existen varias alternativas hidrometalúrgicas para el tratamiento de concentrados sucios, estas han sido desarrolladas en los últimos años y no se han implementado a nivel industrial aún. Alguno de los trabajos más importantes son Mihajlovic *et al.* [2] Peacey, Xian-Jian y Robles [5], Marsden y Wilmot [3] y Jerez, Ruiz y Padilla [4]

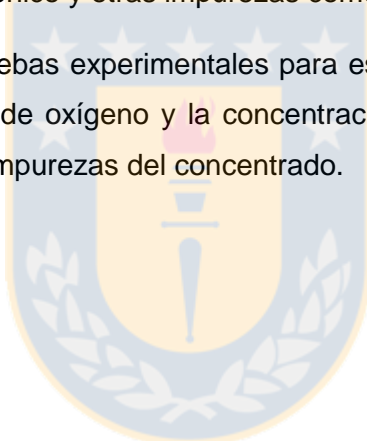
La alternativa pirometalúrgica más extendida a nivel mundial, es la tostación bajo condiciones controladas con el objetivo de volatilizar el arsénico, no obstante otras impurezas como antimonio y bismuto volatilizan muy poco en este proceso.

En esta memoria de título, se estudió el comportamiento de impurezas como arsénico y antimonio en medio clorurante con el objetivo de disminuir los contenidos de estas impurezas en los concentrados de cobre, este estudio se efectuó en el rango de temperaturas de 450°C a 600°C y utilizando cloruro de calcio como agente clorurante.

La principal hipótesis de esta memoria, es que debido a la alta presión de vapor que presentan en general los cloruros metálicos en el rango de temperatura de 450-600°C, la volatilización de impurezas como arsénico, antimonio y bismuto debiese ocurrir.

Por lo tanto el objetivo de esta memoria fue estudiar la cloruración de un concentrado complejo de cobre con altos niveles de arsénico y otras impurezas como antimonio, bismuto, plomo y zinc.

Para ello, se realizaron pruebas experimentales para estudiar el efecto que tienen variables como la temperatura, la presión de oxígeno y la concentración de cloruro en la volatilización de compuestos de arsénico y otras impurezas del concentrado.



2. Antecedentes

2.1 Antecedentes Generales

Minerales que contienen arsénico como la enargita, se encuentran asociados a minerales de cobre como la calcopirita.

La enargita, también denominada tioarseniato cúprico, normalmente se encuentra presente en bajas cantidades en menas calcopiríticas. No obstante es bastante abundante en algunos depósitos, particularmente en aquellos epitermales con un alto nivel de sulfidización y en yacimientos de cobre de tipo porfíricos. [6]

Su estructura cristalina es ortorrómbica, con átomos de azufre en estructura hexagonal y átomos de arsénico y cobre en coordinación tetraédrica.

Algunas propiedades físicas de la enargita se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Propiedades físicas de la Enargita

Propiedad	Valor
Fórmula	Cu_3AsS_4
Masa molecular [g/mol]	393.8
Dureza [Mohs]	3
Punto de fusión [C°]	671
Estructura cristalina	Romboédrica
Densidad a 20°C [g/cm ³]	4.46
Color	Plomo metálico a violeta oscuro

En el pasado, las fundiciones de cobre, han generado cantidades importantes de trióxido de arsénico, lo cual sin duda ha tenido un fuerte impacto en la esperanza de vida de los trabajadores. El arsénico produce un daño acumulativo en el cuerpo, produciendo condiciones biológicas como la polineuritis o atrofia muscular de las extremidades.

En el procesamiento pirometalúrgico de minerales sulfurados de cobre, es posible hallar arsénico en diversas corrientes del proceso, Una fracción importante del arsénico se volatiliza en las etapas de fusión, conversión y refinación a fuego, pasando a la atmosfera en gases fugitivos generalmente como trióxido de arsénico, lo que produce serios problemas medioambientales

Sin embargo, parte del arsénico permanece en el cobre y puede estar presente en los ánodos en concentraciones del orden de 3000 ppm [18], entre las cuales entre un 30-60% se encuentra en forma de solución sólida, el resto es posible encontrarlo como óxidos complejos de cobre-plomo.

En el proceso de refinación electrolítica de los ánodos de cobre el arsénico se distribuye tanto en los barros anódicos como en el electrolito ya que el arsénico en los ánodos presente como solución sólida y como óxidos complejos generalmente se disuelve en forma de, As(III) y posteriormente es oxidado a As(V) por el oxígeno disuelto en el electrolito, no obstante una fracción de los óxidos complejos pasa directamente a los barros anódicos. Parte de estos óxidos complejos finos pueden permanecer suspendidos en el electrolito (barros flotantes) y pueden quedar ocluidos en los cátodos por atrapamiento mecánico.

En la Tabla 2 a continuación, se muestran las principales propiedades físicas del Arsénico

Tabla 2. Propiedades físicas del Arsénico

Propiedad	Valor
Número atómico	33
Masa atómica [g/mol]	74.9216
Punto de ebullición [C°]	616
Punto de fusión [C°]	817
Estructura cristalina	Romboédrica
Valencia	-3,+3,+5
Densidad a 20°C [g/cm ³]	5.77
Resistencia eléctrica a 0°C [μΩ cm]	33.3
Calor de fusión [kJ/kg]	370.3
Calor de evaporación a la temperatura de ebullición [kJ/kg]	426.77
Calor específico a 25°C [J K ⁻¹ kg ⁻¹]	328
Conductividad térmica a 27°C [W m ⁻¹ K ⁻¹]	50

Otra impureza importante en los concentrados de cobre industriales es el antimonio, elemento químico de número atómico 51, poco abundante en la naturaleza y más escaso aun en forma nativa. Aunque existen más de 200 minerales de antimonio, en los depósitos de cobre, plata y plomo, generalmente es posible hallarlo en forma de antimonita, este mineral de color gris plomo, se caracteriza por poseer estructura ortorrómbica con forma de aguja, se asocia con sulfuros como la calcopirita, pirita, calcocina, covelina, enargita, bismutina y mineral refractario de oro. Algunas propiedades de la antimonita se presentan a continuación

Algunas propiedades físicas de la antimonita se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3. Propiedades físicas de la Antimonita

Propiedad	Valor
Fórmula	Sb_2S_3
Masa molecular [g/mol]	339.7
Dureza [Mohs]	2
Punto de fusión [C°]	550
Estructura cristalina	Romboédrica
Densidad a 20°C [g/cm ³]	4.64
Color	Plateada

El antimonio también está presente en los ánodos de cobre, una pequeña fracción (aproximadamente un quinto) en forma de solución sólida y el resto en forma de óxidos complejos presentes en los bordes de grano al interior del ánodo. Al igual que el arsénico el antimonio se reporta al electrolito y a los barros anódicos [18]. Por lo tanto, en la producción de cobre por la vía fusión-conversión-electrorefinación el adecuado control de esta impureza durante las etapas previas a la electrorefinación, resulta crítico para la producción de cátodos de alta calidad, debido a las estrictas normas sobre los contenidos de antimonio de los cátodos.

Un uso actual del antimonio, son las aleaciones de plomo antimonial. Estos 2 metales forman un eutéctico a una concentración de 11.1% de Sb, el cual tiene un punto de fusión de 252°C. Es importante destacar que la solubilidad del antimonio en plomo disminuye desde un máximo de 3.5% a 252°C a 0.25 % a 25°C, temperatura a la cual el antimonio es muy insoluble, esto permite obtener una aleación de plomo, saturada en antimonio mediante un enfriamiento rápido de la solución.

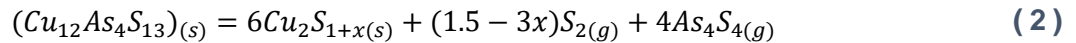
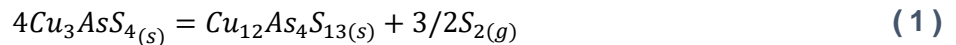
Algunas propiedades físicas del antimonio se muestran en la Tabla 4.

Tabla 4. Propiedades físicas del Antimonio

Propiedad	Valor
Número atómico	51
Masa atómica [g/mol]	121.750
Punto de ebullición [C°]	1587
Punto de fusión [C°]	630
Estructura cristalina	Romboédrica
Valencia	-3,+3,+5
Densidad a 20°C [g/cm ³]	6.697
Resistencia eléctrica a 0°C [μΩ cm]	39
Calor de fusión [kJ/kg]	163.2
Calor de evaporación a la temperatura de ebullición [kJ/kg]	1602
Calor específico a 25°C [J K ⁻¹ kg ⁻¹]	207
Conductividad térmica a 27°C [W m ⁻¹ K ⁻¹]	24.3

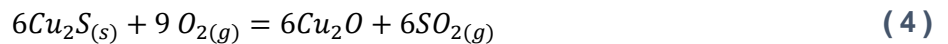
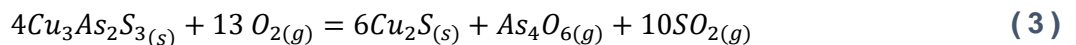
2.2 Reacciones de Enargita y Antimonita a alta temperatura.

La descomposición térmica de la enargita en ambiente neutro fue estudiada por Padilla *et al.* en 2000 [7], quienes determinaron que no era termodinámicamente factible que la enargita se transformara directamente en calcosina. Por lo cual representó la descomposición térmica de la enargita como una reacción de descomposición térmica que se produce en 2 etapas consecutivas, de acuerdo a las ecuaciones que se muestran a continuación.



La energía de activación informada para el rango de temperaturas de 575 a 700°C fue de 125 [kJ/mol] para la primera etapa y de 236 [kJ/mol] para la segunda etapa.

En ambiente oxidante Padilla *et al.* [8] estudiaron el comportamiento de la enargita por termogravimetría en el rango de temperaturas 375-625°C, utilizando diferentes mezclas de nitrógeno-oxígeno. Estos investigadores concluyeron que la descomposición térmica de la enargita, en medio oxidante ocurría en 3 etapas sucesivas como se muestra a continuación



Encontraron que estas 3 reacciones ocurren de manera consecutiva a diferentes cinéticas y las 3 eran afectadas significativamente por la temperatura y la presión parcial de oxígeno. La cinética de la primera etapa de la reacción (ecuación 3) es de orden 0.9 con respecto a la presión parcial de oxígeno y posee una energía de activación de 44 kJ/mol en el rango de temperaturas de 375-625[°C].

Las reacciones más importantes que ocurren en la volatilización de la antimonita fueron reportadas por Komorova et al., Padilla et al. y Zivkovic et al.

Komorova *et al.* [10] estudiaron la volatilización de antimonita desde sales sintéticas como la tetraedrita en ambiente neutro en el rango de temperaturas de 600 a 824°C. Los investigadores determinaron que en ese rango de temperaturas el antimonio volatiliza como trisulfuro de antimonio, de acuerdo a la Ecuación 6.



Posteriormente Padilla et al. [12] estudiaron la descomposición de antimonita en atmósfera de nitrógeno, sus resultados indicaron que en una atmósfera inerte, el antimonio podía ser volatilizado de forma más eficiente como $Sb_2S_3(g)$. A temperaturas sobre 950°C la antimonita se descompone como antimonio y azufre gas, lo cual perjudica la volatilización de antimonio.

En 2002, Zivkovic *et al.* [11] utilizó métodos termo-gravimétricos y mediante el uso de difracción de rayos X logró identificar las diferentes especies de antimonio que se iban formando a partir de una muestra de antimonita sintética. Su estudio fue realizado en el rango de 200-800[°C]

El propuso que la antimonita se oxida inicialmente a valentinita (Sb_2O_3) y posteriormente a cervantita (Sb_2O), según las reacciones 7 y 8.

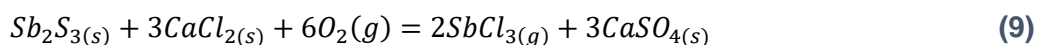


Esta sobreoxidación de la antimonita, se ve favorecida a presiones altas de oxígeno y temperaturas superiores a los 500°C, lo cual limitaría la volatilización de la antimonita debido a que este producto no es volátil en estas condiciones.

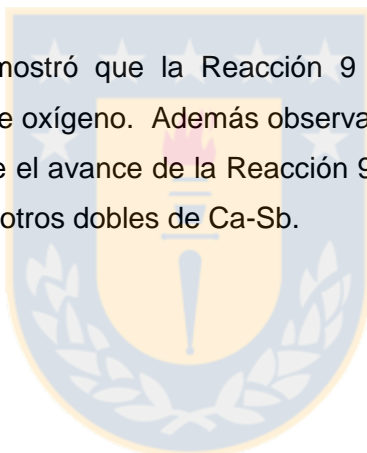
Posteriormente [13] Padilla *et al.* en 2010 estudiaron la volatilización de antimonita en ambientes de nitrógeno y mezclas de nitrógeno-oxígeno, en el rango de temperatura de 700-1150[°C], utilizando también termo-gravimetría. En este estudio se verificó la reacción propuesta por Zivkovic *et al.* además determinaron que en atmósferas con bajo contenido de oxígeno (de 1-5% oxígeno) y a temperaturas elevadas (900-950°C) era posible volatilizar antimonita en forma de $Sb_2O_{3(g)}$.

Finalmente, en 2015 Padilla *et al.* [14] lograron demostrar que era posible volatilizar óxido antimonio a temperaturas más bajas, debido a la formación de óxidos volátiles complejos de antimonio y arsénico.

Respecto a la cloruración de enargita, la información previa disponible es muy escasa. Sin embargo, Padilla y Moscoso [15,16] estudiaron la volatilización de antimonita. Moscoso, en su memoria de título trabajó en el rango de temperaturas de 550-800°C mostrando que era posible clorurar la antimonita a alta temperatura utilizando cloruro de calcio como agente clorurante. Mediante análisis por difracción de rayos X se determinó la presencia de sulfato de calcio en las calcinas producidas a alta temperatura en condiciones oxidantes, lo cual sugiere que el mecanismo mediante el cual es posible clorurar la antimonita es por medio de la siguiente reacción.



En estos trabajos, se mostró que la Reacción 9 se ve fuertemente afectado por la temperatura y la presión parcial de oxígeno. Además observaron incrementos en la presión parcial de oxígeno, afecta negativamente el avance de la Reacción 9, debido a la formación de óxidos no volátiles como Sb₂O₄ y Sb₂O₅ y otros dobles de Ca-Sb.



3. Desarrollo experimental

3.1 Equipos

Para el desarrollo de esta memoria de título, se utilizó como equipo principal un horno horizontal marca LindBerg Blue M, con una temperatura máxima de operación de 1200°C, al interior del horno se dispuso un tubo de alumina con un diámetro de 2.5 pulgadas, que permite la incorporación de un sistema de refrigeración en uno de los extremos. En ese extremo se incorporó un sistema que permite inyectar los diferentes gases, además de un sistema manual que permitió insertar y retirar la navecilla con la muestra sólida de la zona de operación del horno.

En el otro extremo del tubo, se dispuso un sistema que permite evacuar los gases generados durante los experimentos, conectado a un matraz kitazato que contenía una solución de 1 mol/L de NaOH. Además, en este extremo se tuvo insertada una termocupla tipo K.

Los equipos auxiliares conectados al horno fueron un controlador de temperaturas marca LindBerg Blue M, un lector de temperatura Digi-Sense Scanning Thermometer.

En la Figura 1 a continuación se muestra un esquema de la configuración del equipo utilizado.

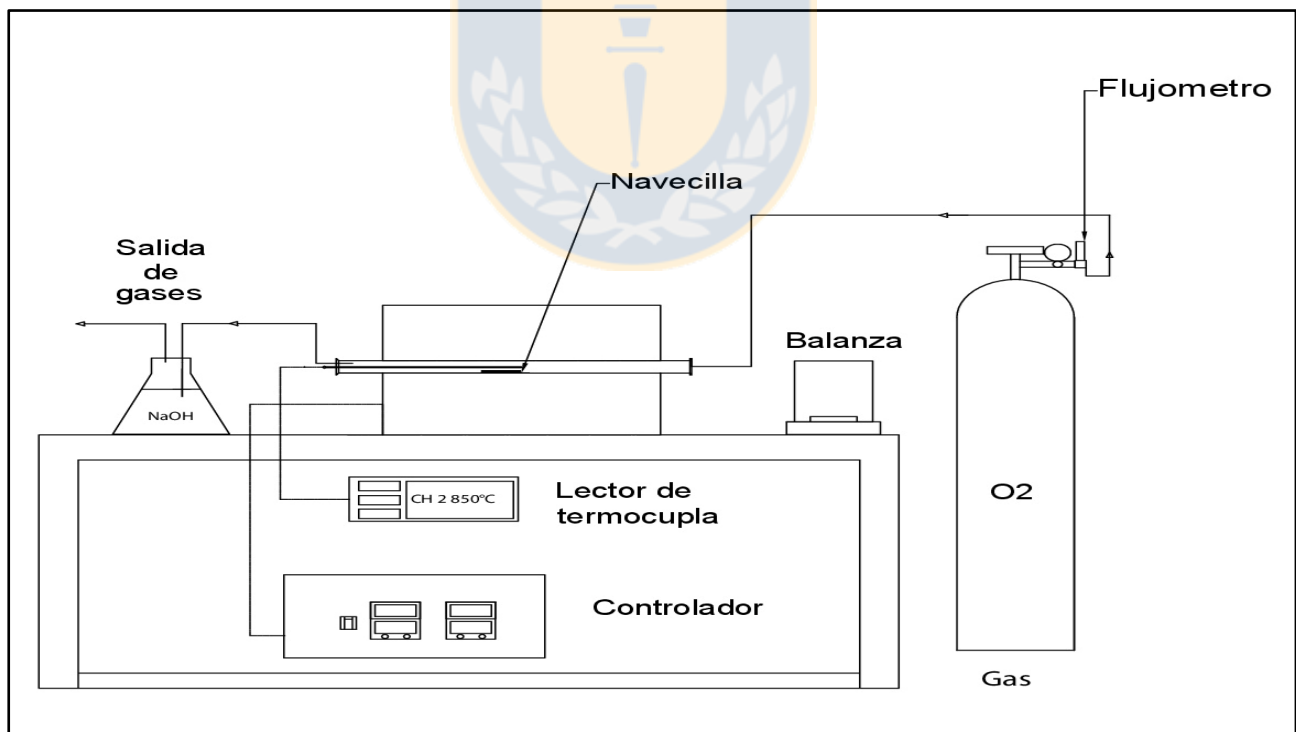


Figura 1. Diagrama de equipo de cloración de concentrados

3.2 Minerales y reactivos

En el trabajo experimental, se utilizó un concentrado industrial proveniente de la División Ministro Hales de Codelco (MH) usado tal y como se recibió, Las muestras para la caracterización del concentrado y para las pruebas experimentales se obtuvieron mediante el procedimiento de roleo y cuarteo.

El análisis granulométrico de la muestra se realizó mediante difracción de rayos laser en un rango de 0.3 a 2000 [μm], sus resultados se muestran en la Figura 2.

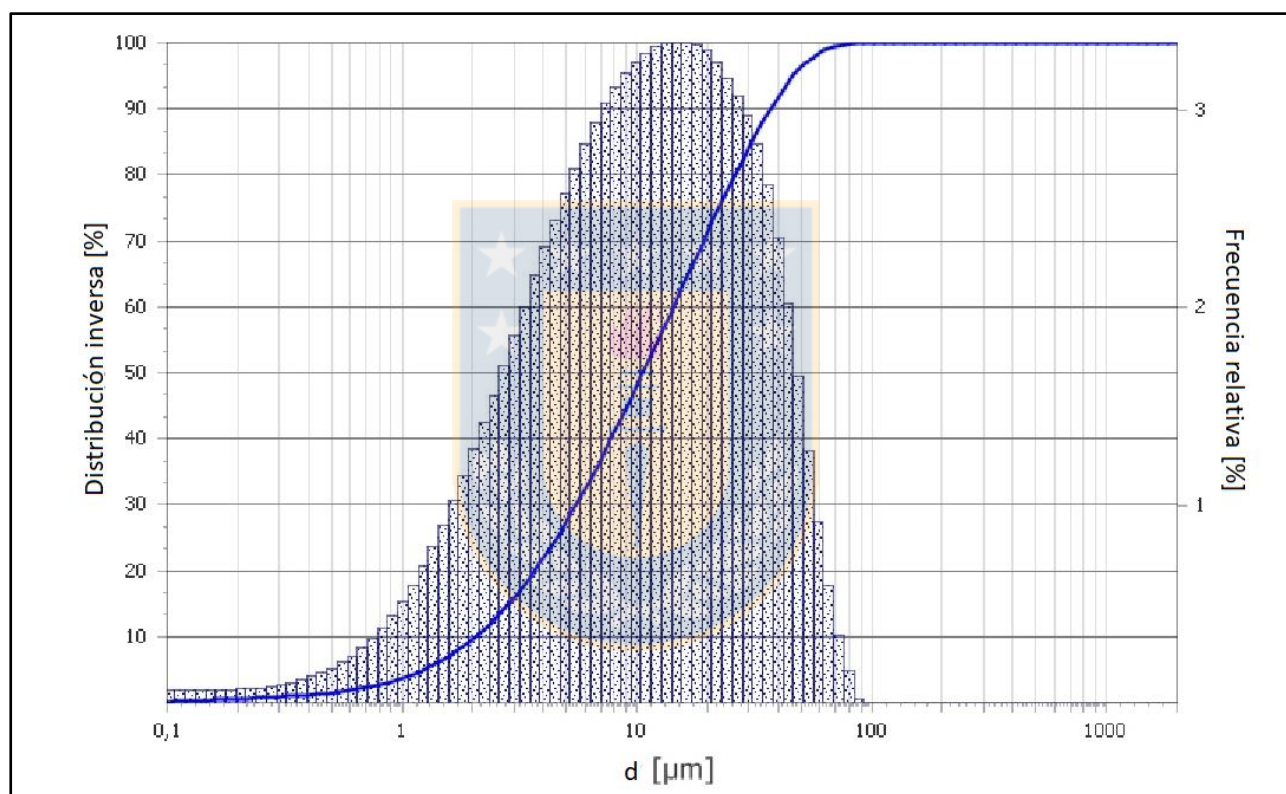


Figura 2. Resultado análisis granulométrico laser

En la Figura 4 es posible apreciar que el concentrado presenta un tamaño bastante fino, el 100% de las partículas poseen un tamaño inferior a 92 [μm]

El análisis de la muestra por DRX, se realizó utilizando un equipo Bruker® D4 Endeavor, sus resultados se aprecian en las figura que se muestra a continuación

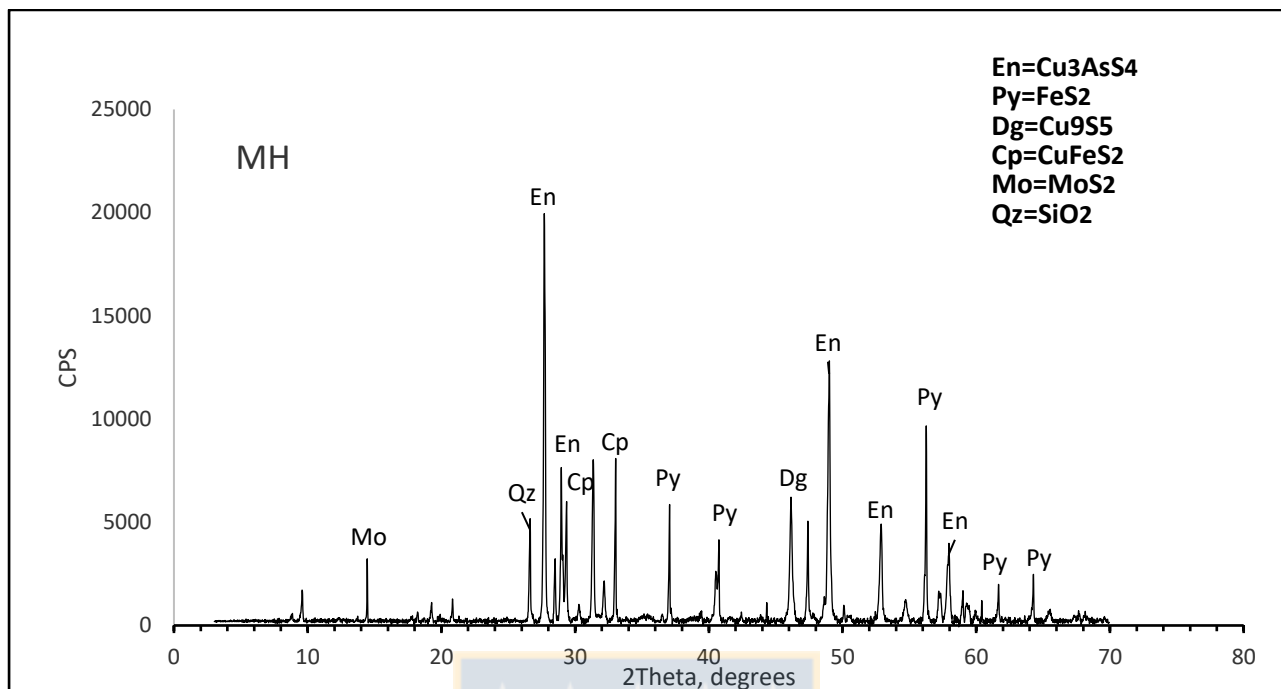


Figura 3. Difractograma del concentrado MH

En la Figura 3 es posible apreciar que las principales especies minerales presentes en el concentrado MH son enargita (Cu₃AsS₄), pirita (FeS₂), digenita (Cu₉S₅), calcopirita (CuFeS₂), cuarzo (SiO₂) y molibdenita (MoS₂).

Finalmente, la muestra de concentrado MH fue sometida a un análisis químico por digestión ácida seguida de análisis de la solución mediante absorción atómica, los resultados de los principales elementos se muestran en la Tabla 8.

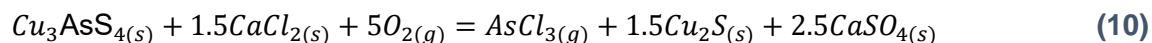
Tabla 5. Composición química concentrado industrial MH

% Cu	%Fe	%As	%Zn	%Sb	%Pb	Bi [ppm]
38.19	11.65	4.98	0.85	0.38	0.08	<37

El reactivo utilizado para clorurar fue cloruro de Calcio di-hidratado (Merck), con una pureza de 99.99%, todas las mezclas de N₂-O₂ utilizadas en el desarrollo experimental, fueron suministrados por INDURA S.A.

3.3 Preparación de muestras de concentrado-cloruro de calcio.

Primeramente, se preparó una mezcla denominada M1, para ello se mezcló concentrado MH y cloruro de calcio en proporciones estequiométrica según la Ecuación 10



Posteriormente, se preparó una segunda mezcla denominada M2, para esto se utilizó una mezcla de concentrado MH y cloruro de calcio según la proporción 3:1 en peso. Considerando la reacción (10) esta mezcla contiene a un exceso de cloruro de calcio del 260%

La composición de las muestras M1 y M2 se muestra a continuación en la Tabla 6

Tabla 6. Composición de mezclas concentrado-cloruro de calcio

Muestra	Concentrado de cobre [%]	Cloruro de calcio di-hidratado [%]
M1	88.8	11.11
M2	69.3	30.7

3.4 Procedimiento experimental

Previo a las pruebas, se realizaron mediciones de temperatura en el horno con el fin de determinar el perfil térmico del tubo de reacción, el perfil se determinó a 2 temperaturas constantes de 450°C y 750°C y un flujo de gas de 0.2 [L/min] con el objeto de encontrar una región al interior del horno en la cual la temperatura fuera constante. Los resultados obtenidos se muestran a continuación en la Figura 4.

El origen de la abscisa en la Figura 4, corresponde a la entrada del horno, y el otro extremo del horno está ubicado a 55 cm. En esta figura, es posible apreciar que existe una región de temperatura estable de ubicada entre 22 y 30 centímetro

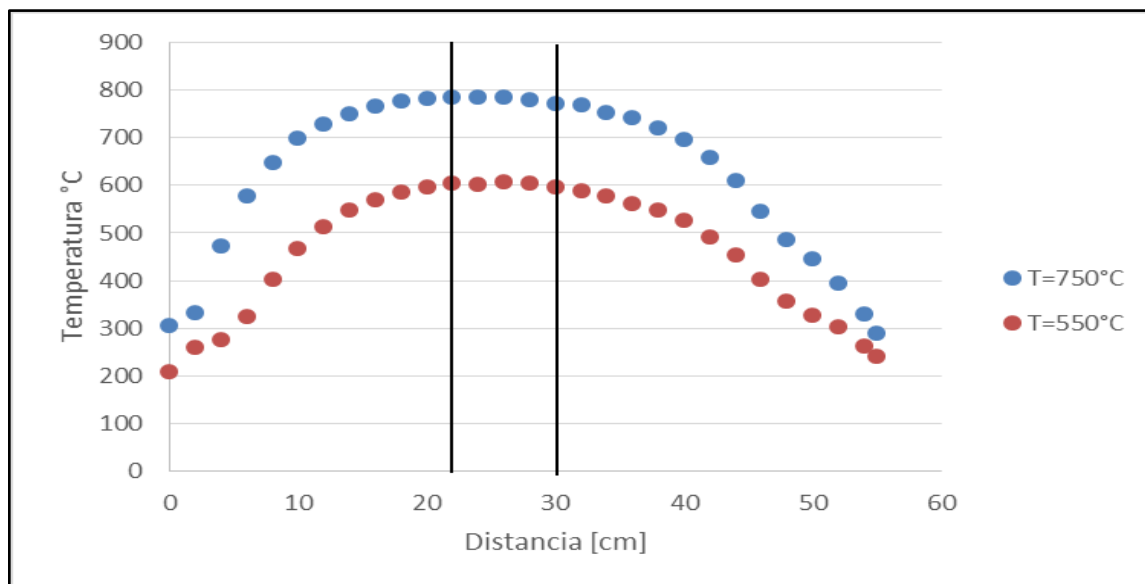


Figura 4. Perfil térmico horno horizontal (el origen corresponde a un extremo del horno)

El procedimiento experimental para las pruebas de volatilización comenzaba con el encendido del horno para alcanzar la temperatura deseada, además se insuflaba el gas al interior del horno a una tasa de 0.2 L/min, para estabilizar temperatura del gas al interior del tubo de reacción, se verificaba el sellado del tubo de manera visual observando burbujeo en el matraz de captura de gases.

Para el inicio de una prueba, se destapaba el horno, se insertaba una navicilla que contenía aproximadamente 1 [g] de muestra en una región del tubo de reacción que se encontraba a una temperatura de aproximadamente 300°C, donde la muestra era precalentada un tiempo cercano a 5 minutos, con el objetivo que no se produjera un descenso brusco de la temperatura del horno al insertar la muestra fría en la región central del tubo de reacción. Una vez que la muestra se movía a la zona de temperatura constante, se empezaba a contar el tiempo definido para cada prueba.

Una vez terminada la prueba, se retiraba la muestra hasta la región del tubo que se encuentra fuera del horno, para evitar un cambio brusco de temperatura de la muestra, finalmente se extraía la navicilla y se almacenaba al interior de un desecador, hasta que se enfriara completamente para proceder a registrar la masa final de la muestra.

4. Resultados y discusiones

4.1 Pruebas preliminares

Se realizaron pruebas preliminares, para determinar el comportamiento de la muestra M2 a 500°C y una atmósfera de 10% O₂ los resultados se muestran en la Figura 5 a continuación.

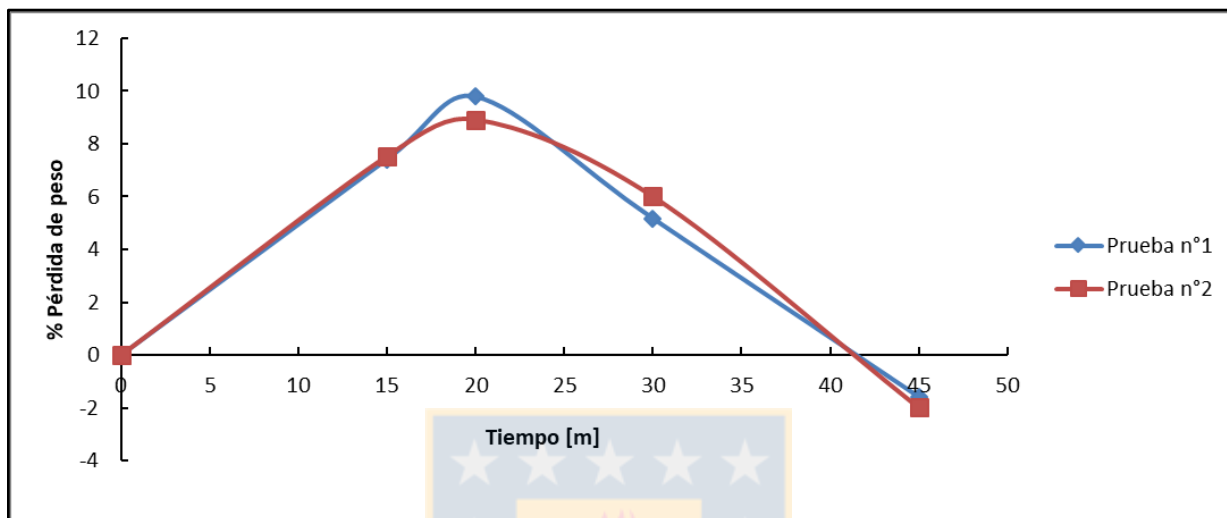


Figura 5. Porcentaje pérdida de peso de M2 a 500°C y 10% O₂

En esta Figura 5, se puede apreciar que la muestra pierde rápidamente peso por volatilización, hasta alcanzar una pérdida del orden de 11%, a los 20 minutos. Después de este tiempo, la muestra comienza a ganar peso debido a que comienza la oxidación/sulfatación de algunos componentes.

Es importante notar, que para tiempos largos la muestra gana peso, debido a que algunos componentes de la mezcla fijan una gran cantidad de oxígeno y azufre, esto se debe principalmente a que bajo estas condiciones de presión y temperatura, especies como el sulfato de hierro (FeSO₄) y sulfato de cobre (CuSO₄) son termodinámicamente estables [17]

Es posible observar también en la Figura 7 que los resultados experimentales en la prueba batch son reproducibles con error despreciable.

4.2 Efecto de la temperatura en la pérdida de peso y volatilización de impurezas en oxidación y cloruración de concentrado de cobre

Una de las impurezas presentes en los concentrados de cobre más refractarias a ser volatilizadas, en ambiente oxidante, es el antimonio, presente generalmente como antimonita.

Debido a esto, se estudió el efecto que tiene la cloruración en la volatilización de este compuesto, para ello se analizó el contenido de antimonio de algunas calcinas producidas en este trabajo mediante análisis por absorción atómica y se calcularon los porcentajes de volatilización por diferencia con el análisis inicial de Sb.

Los resultados se muestran a continuación en la Figura 6 a continuación. Las pruebas se realizaron en una atmósfera con 5% de oxígeno.

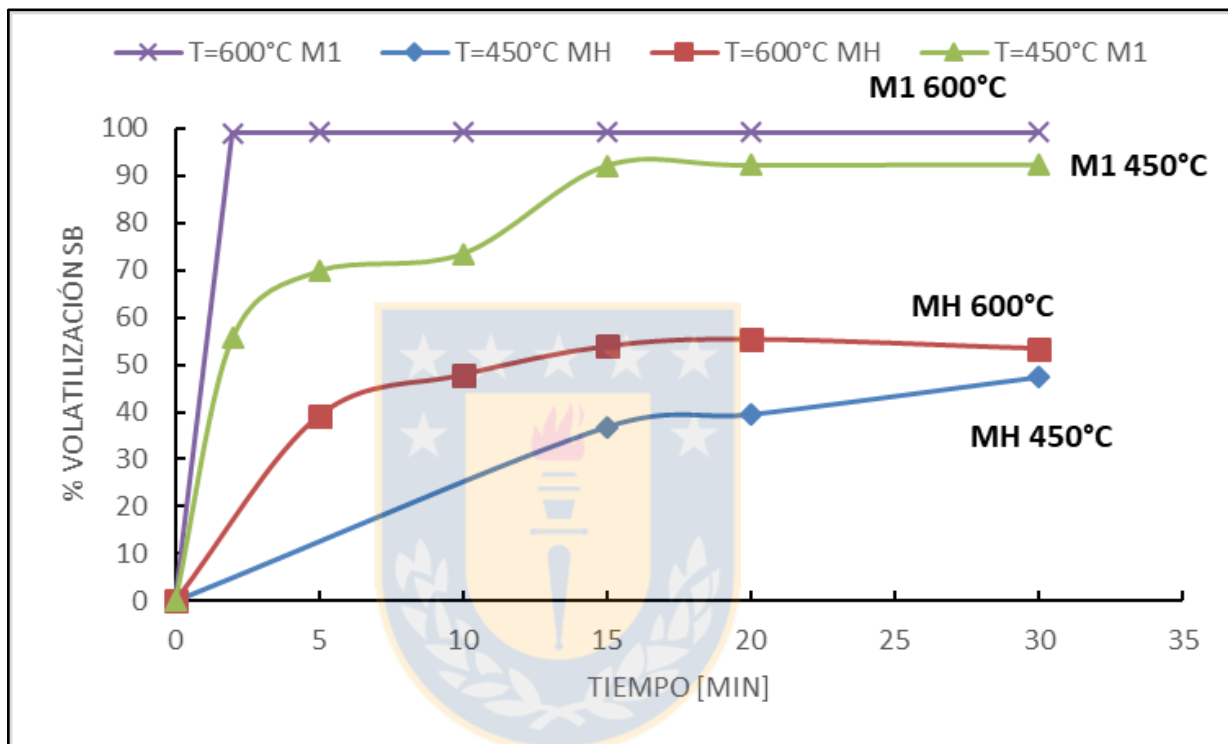


Figura 6. Volatilización de antimonio para la muestra MH y mezcla M1 con 5% O₂

En la Figura 6, se puede notar claramente el efecto favorable que tiene el cloruro de calcio en la volatilización de antimonio. En ambiente oxidante, por ejemplo a una temperatura de 600°C solamente es posible volatilizar cerca de un 55% del antimonio presente en el concentrado (MH) a una temperatura de 600°C, mientras que a la misma temperatura en presencia de CaCl₂ es posible volatilizar más de 99% del antimonio presente en la mezcla M1.

Para estudiar el efecto de cloruración y oxidación en la pérdida de peso de las calcinas, se realizaron experimentos a temperaturas de 450-600°C y una atmósfera 5%O₂, la Figura 7 muestra los resultados obtenidos para MH, la Figura 8 y 9 muestran los resultados para las muestras que corresponden a mezclas de cloruro de calcio y concentrado, denominadas M1 y M2, cuya composición se describió en la tablas 6 y 7 respectivamente.

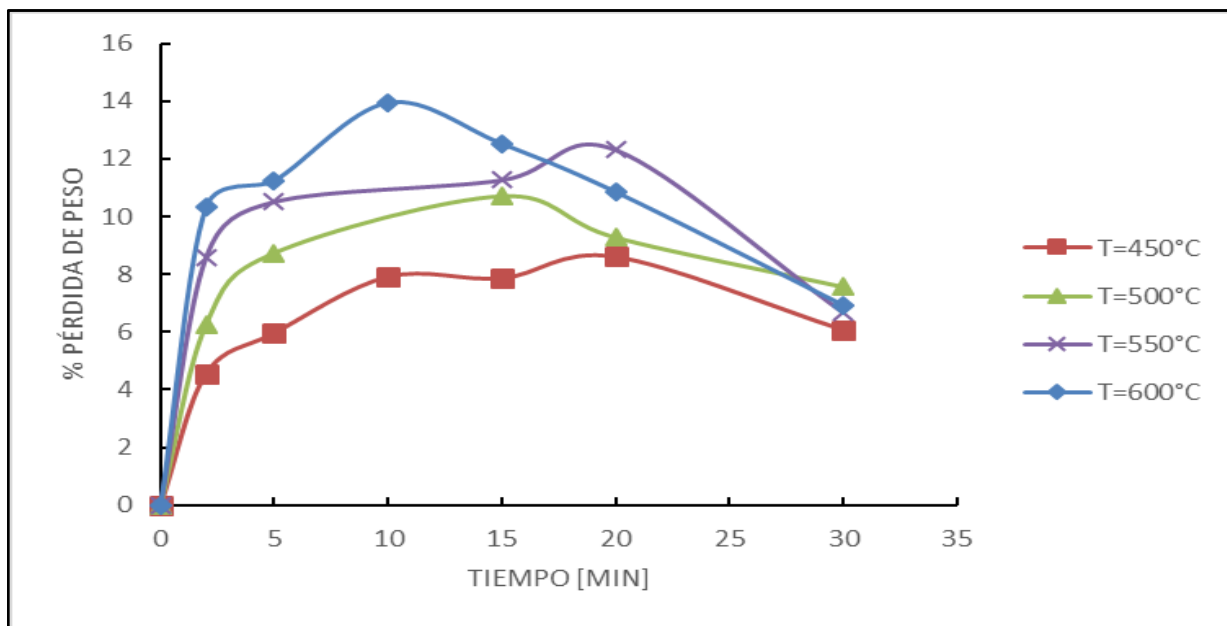


Figura 7. Efecto de temperatura en el porcentaje pérdida de peso de la mezcla MH

Condiciones de operación: 5%O₂

En la Figura 7 es posible apreciar, que la pérdida de peso de la muestra de concentrado MH en ambiente oxidante se ve fuertemente influenciada por la temperatura. Por ejemplo, en las pruebas llevadas a cabo a una temperatura de 450°C la máxima pérdida de peso observada es aproximadamente 8% y se alcanza a los 20 minutos de reacción. Sin embargo a 600°C, la máxima pérdida de peso observada fue de aproximadamente un 14% y ocurrió a un tiempo de reacción de 10 minutos.

En la Figura 8 es posible apreciar, que la pérdida de peso en cloruración se ve influenciada también por la temperatura alcanzado un máximo de 14% para la temperatura de 600°C, este máximo fue observado a un tiempo de 15 minutos, no obstante a 450°C la pérdida de peso ocurre de forma más paulatina, la máxima pérdida de peso fue observada a los 20 minutos.

Posteriormente, se hicieron pruebas en las mismas condiciones experimentales utilizando una mezcla con mayor contenido de cloruro de calcio M2, los resultados de estas experiencias se muestran en la Figura 9.

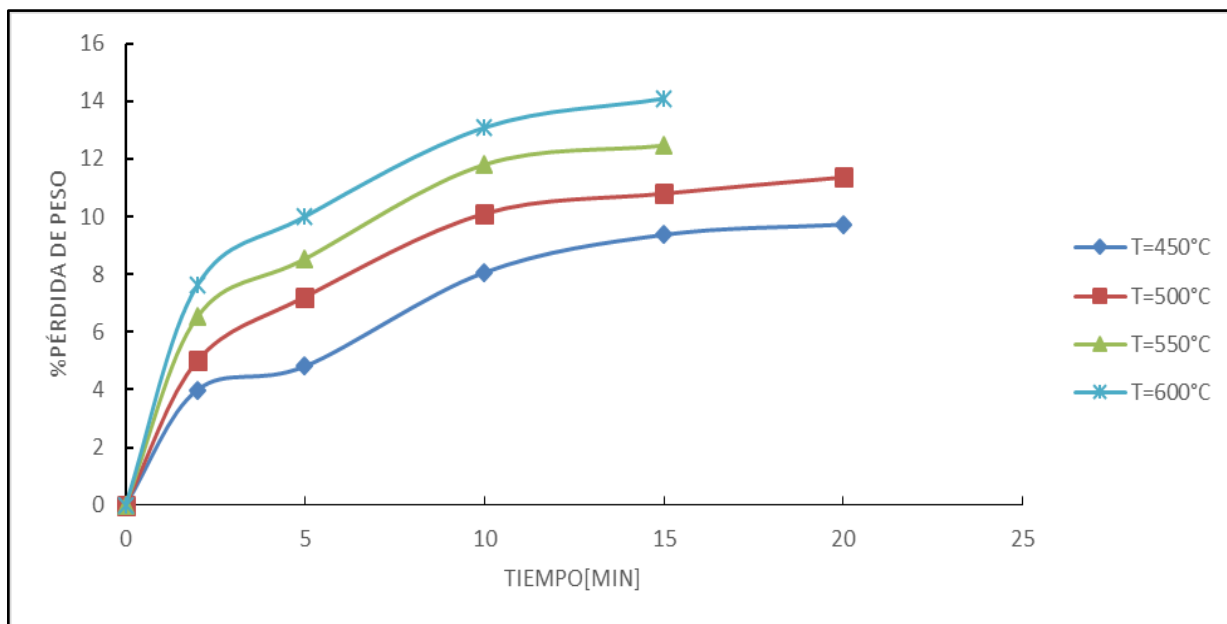


Figura 8. Efecto de la temperatura en la pérdida de peso de la mezcla M1

Condiciones de operación: 5% O₂

En la Figura 9, es posible apreciar, que la pérdida de peso de la muestra M2, se ve afectada también por la temperatura. En este caso la pérdida de peso máxima de 12.7% se observa para la temperatura de 550°C, a un tiempo de 20 minutos. A 450°C la pérdida de peso, ocurre de forma más paulatina, por lo que la máxima pérdida de peso se observa a un tiempo de 45 minutos. En cloruración también se observa un comportamiento similar a la oxidación, por ejemplo, la muestra en 15 minutos y 500°C alcanza una pérdida de peso de 11%, y en las mismas condiciones, pero en 20 minutos, esta pérdida de peso alcanza solo un 8%. Para efectos de esta memoria de título, solo se consideran aquellos resultados hasta antes de la oxidación/sulfatación de la calcina, procesos que no contribuyen a la volatilización de impurezas.

Respecto a que la pérdida de peso de M2 sea menor en relación a su par M1 (estequiométrica), se puede explicar debido al menor contenido de azufre de esta muestra, que es el principal elemento que volatiliza durante estas condiciones.

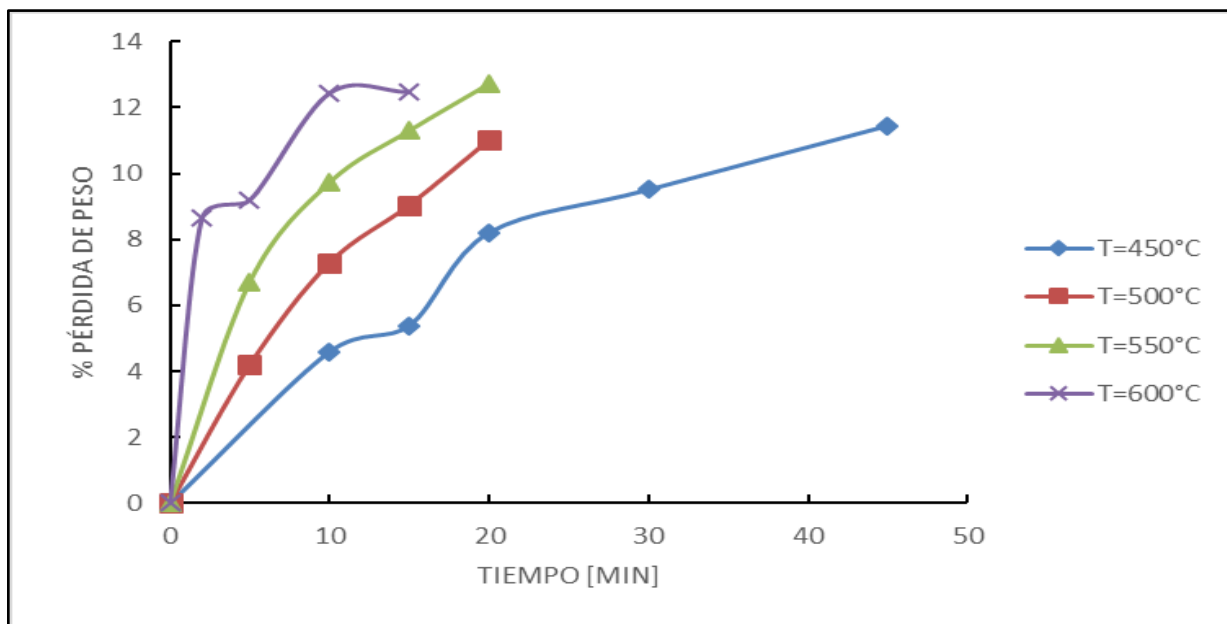


Figura 9. Efecto de temperatura en el porcentaje pérdida de peso para la mezcla M2

Condiciones de operación: 5%O₂

4.3 Efecto de la presión parcial de oxígeno en volatilización clorurante

Para determinar el efecto que tiene la presión parcial de oxígeno sobre la pérdida de peso de la mezcla concentrado-cloruro de calcio, se realizaron pruebas a 600°C, utilizando la muestra M1 y diferentes composiciones de oxígeno-nitrógeno. Se utilizaron mezclas gaseosas de 1%, 5% y 10% de oxígeno. Los resultados se muestran a en la Figura 10 a continuación.

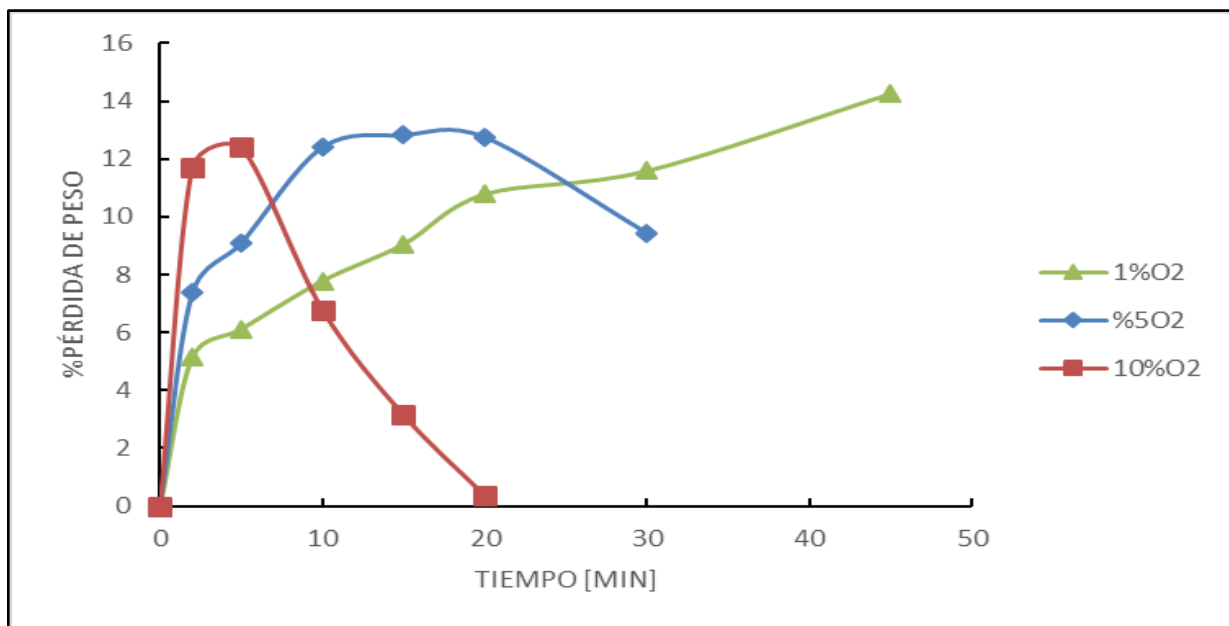


Figura 10. Efecto de la presión parcial de O₂ para la mezcla M1. Temperatura = 600°C

Es posible observar que la presión parcial de oxígeno tiene un efecto importante en la pérdida de peso de la muestra. Para 1% oxígeno, la pérdida de peso es bastante lenta y casi instantánea para 10% de oxígeno. Sin embargo, es posible observar que para 10% de oxígeno, la muestra se oxida rápidamente, alcanzando su máxima pérdida de peso a los 5 minutos y para tiempos de reacción más prolongados la pérdida de peso es menor, debido al oxígeno que se fija en la calcina formando compuestos oxidados.

Para una atmósfera 1% oxígeno, no es posible notar este efecto de oxidación/sulfatación incluso a un tiempo de reacción de 45 minutos.

4.4 Caracterización de las calcinas por DRX

Debido a la gran cantidad de minerales presentes en el concentrado, es importante analizar las calcinas producidas en este proceso, para determinar los productos sólidos formados y cuáles son las principales especies que van reaccionando para diferentes tiempos de reacción

Para visualizar mejor los cambios experimentados por las muestras volatilizadas es necesario referirse al difractograma inicial del concentrado industrial de cobre MH. (Véase Figura 3)

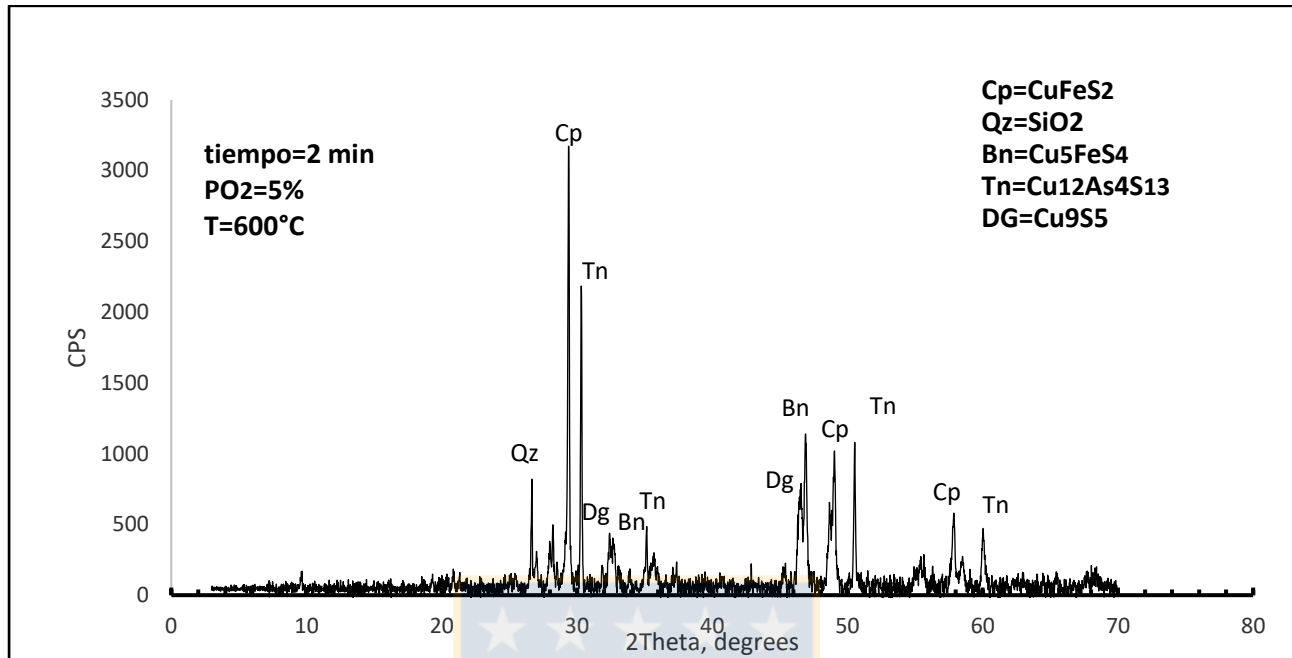


Figura 11. Difractograma de la mezcla M1 obtenida a 2 min. En 5% O₂ a 600°C

En la Figura 11, es posible apreciar que a 2 minutos de reacción ya no se encuentra presente la línea de difracción correspondiente a enargita (Cu₃AsS₄), además aparecen claramente líneas de difracción de tenantita (Cu₁₂As₄S₁₃), que es el producto de la primera etapa de la descomposición térmica de la enargita. También es importante notar que en aproximadamente 32 grados aparece una línea de digenita (Cu₉S₅), probablemente producto de la descomposición térmica de una pequeña fracción de tenantita, lo que corroboraría la descomposición térmica de la enargita.

La línea de difracción de la molibdenita (MoS₂) que se observan en la Figura 3, ya no son visibles en la Figura 11. Esto se debe a que la molibdenita reacciona con el oxígeno presente en la atmósfera rápidamente a temperaturas superiores a 550°C. El trióxido de molibdeno se volatiliza debido a su alta presión de vapor y no es posible apreciar compuestos de molibdeno en la calcina.

Tanto en este difractograma, cómo en los que se muestran a continuación, es posible observar presencia de bornita, esta presencia de bornita también se ha informado en la literatura en reacciones que involucran enargita. [19, 20].

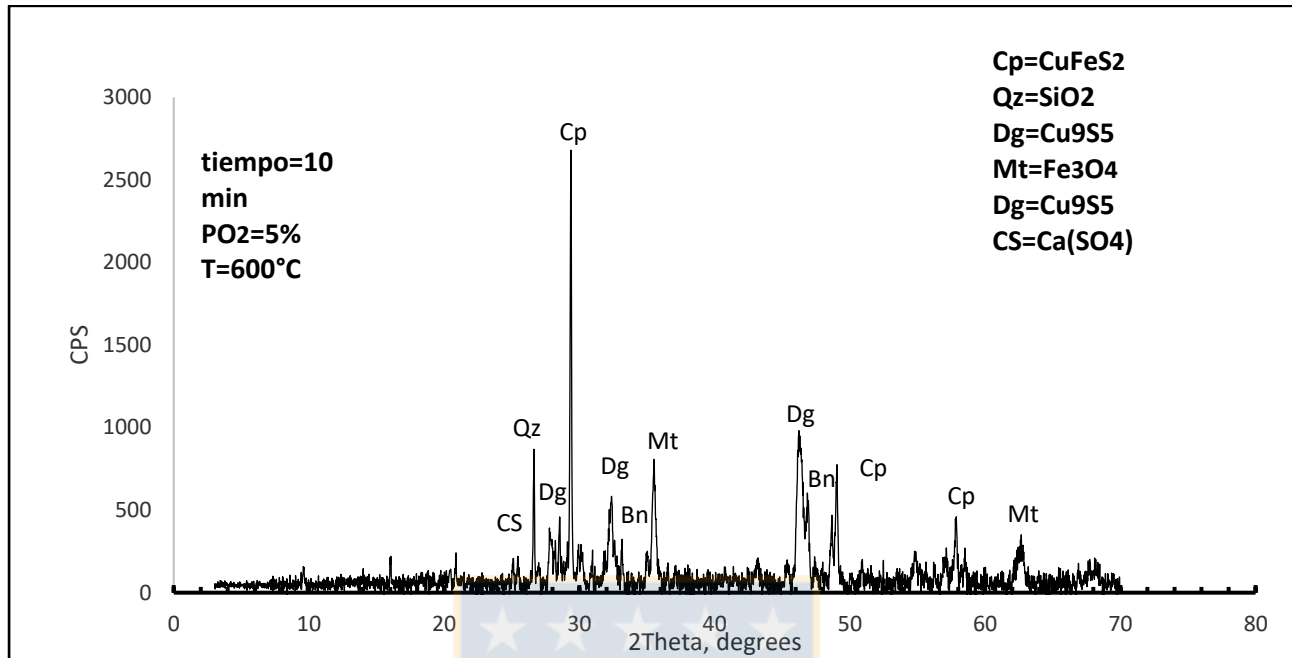


Figura 12. Difractograma de la mezcla M1 obtenida a 10 min. En 5% O₂ a 600°C

Tras 10 minutos de reacción, es posible apreciar la desaparición casi completa de la tenantita, que se descompone en digenita. Además se aprecia la formación de una cantidad no despreciable de magnetita (Fe₃O₄), producido por la oxidación de la pirita. Además es posible apreciar también la presencia de sulfato de calcio en la calcina. (CaSO₄)

A continuación, se presenta el efecto de la presión parcial de oxígeno. En las figuras 13 y 14 se observan los difractogramas obtenidos a 600°C y 2 minutos de reacción, las presiones elegidas fueron 1% y 10% de O₂.

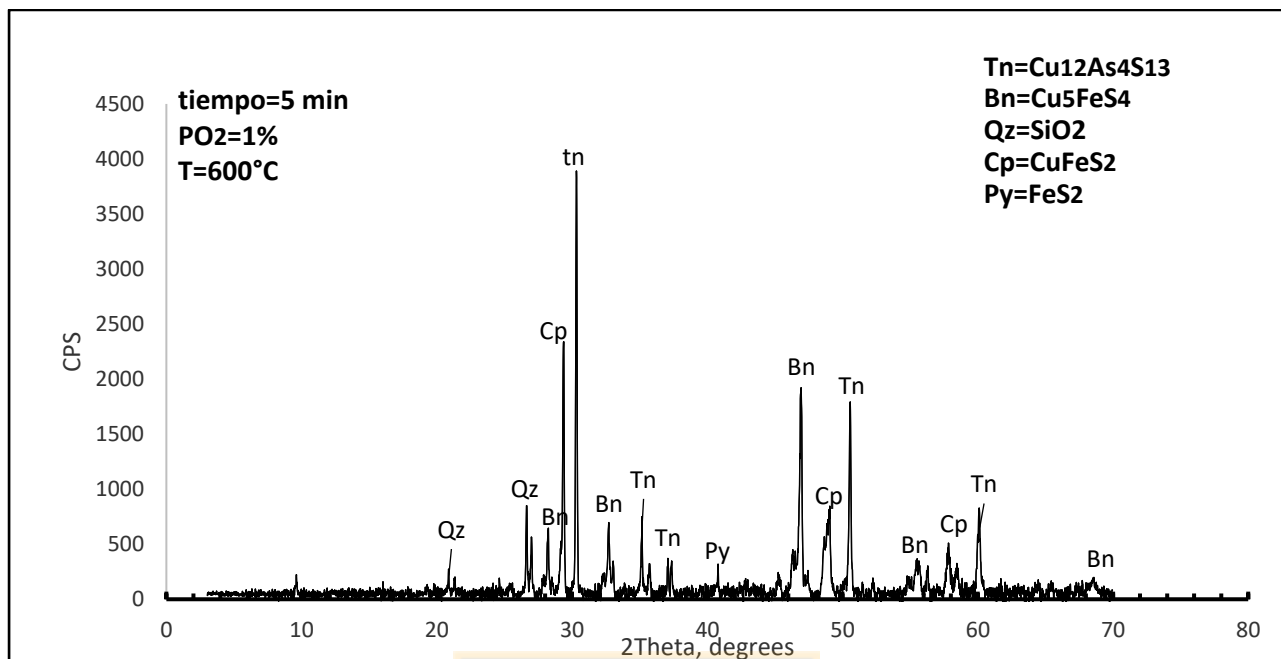


Figura 13. Difractograma de la mezcla M1 obtenida a 5 min. En 1% O₂ a 600°C

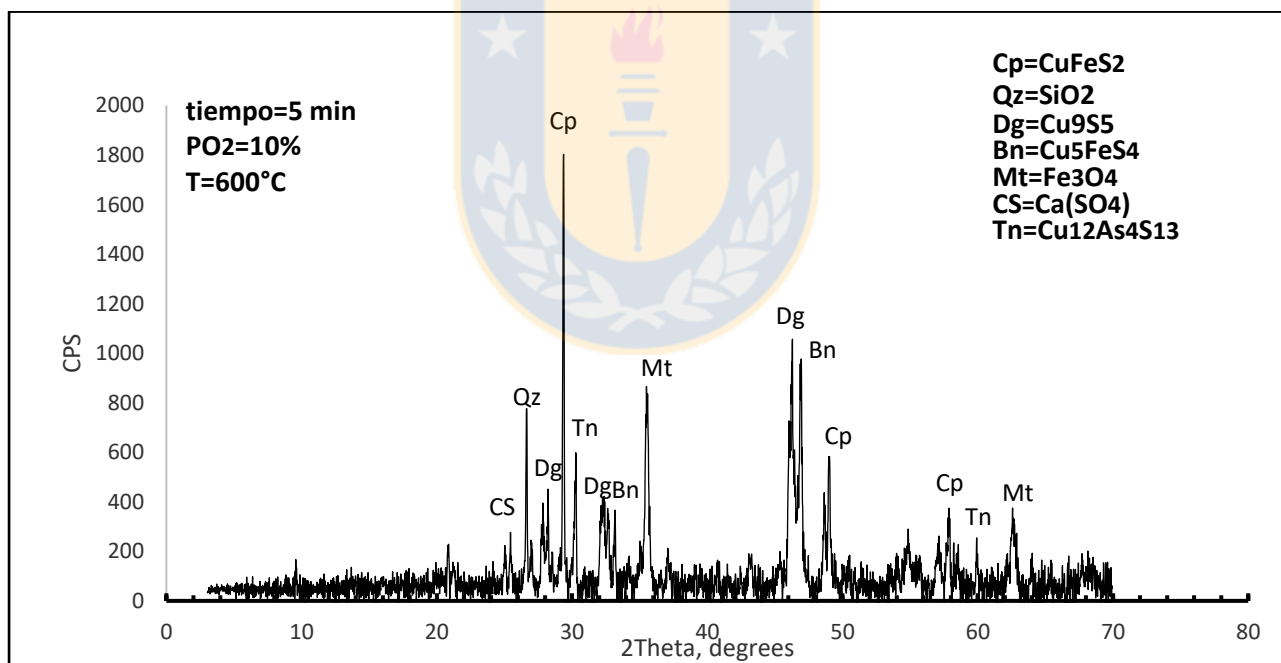
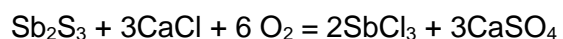


Figura 14. Difractograma de la mezcla M1 obtenida a 5 min. En 10% O₂ a 600°C

En la Figura 13, se puede observar que para una presión de O₂ de 1%, la descomposición de la tenantina es bastante más lenta y no es posible observar especies oxidadas como la magnetita, al contrario de la Figura 14, en dónde es posible observar que las líneas de difracción de la tenantina, son bastante más pequeñas y ya se ha formado una gran cantidad de digenita. Además es posible ver las líneas de difracción de compuestos como la magnetita y sulfato de calcio.

Este análisis por DRX indicaría que hubo generación de cloro gaseoso, debido a la presencia de sulfato de calcio en la calcina, lo cual sugeriría que se produjo la volatilización de algunos metales en forma de un cloruro volátil, para el caso del antimonio esta reacción fue estudiada por Moscoso et al. [16] y corresponde a la Ecuación:



Adicionalmente, la presencia de tenantita en algunas de las calcinas de reacción, sugiere que la adición de cloruro de calcio no tendría efecto en la descomposición de la enargita en ambiente oxidante.



5. Conclusiones

De los resultados obtenidos es posible concluir lo siguiente:

1. La pérdida de peso de todas las muestras, fue fuertemente afectada por la temperatura, en el rango de temperaturas de 450-600°C, el concentrado industrial a 450°C perdió un 8% de peso, sin embargo a 600°C perdió un 13% de peso. Para el caso de la mezcla M1, esta perdió un 11% de peso a 450°C y a 600°C, perdió 14% de su peso.
2. La presión parcial de oxígeno, afecta la velocidad de pérdida de peso de la muestra M1, no obstante a tiempos de reacción prolongados, el oxígeno sobreoxida rápidamente el concentrado formando óxidos no volátiles, lo cual afecta negativamente la pérdida de peso. Esto fue posible corroborarlo mediante el análisis de los difractogramas obtenidos a diferentes presiones parciales de oxígeno.
3. El resultado del análisis químico por antimonio entre una muestra clorurada y una muestra sin clorurar (M1 y M0 respectivamente) muestra una diferencia importante en la volatilización de antimonio. Para una muestra clorurada, fue posible obtener una volatilización de hasta 99% y para la muestra sin clorurar una volatilización de hasta 55%.
4. Los resultados del análisis mediante DRX indicarían que la reacción de cloruración de algunos minerales como antimonita ocurre con la formación de sulfato de calcio, adicionalmente, fue posible determinar mediante los análisis químicos de las calcinas que la volatilización de antimonio desde un concentrado se ve afectada por la temperatura. Para 600°C se alcanzó una volatilización de 99% y para 450°C se alcanzó una volatilización de 90%.
5. El análisis mediante DRX, mostraría que la presencia de cloruro de calcio no produce una diferencia en la descomposición de enargita en ambiente oxidante, lo cual indicaría que la presencia de cloruro de calcio, no afectaría la volatilización de arsénico desde un concentrado de cobre.

6. Bibliografía

- 1) Peacey, J., Xian-Jian, G., and Robles, E., 2004, "Copper hydrometallurgy-current status, preliminary economics, future directions and positioning versus smelting." Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 14, pp. 560-568.
- 2) Mihajlović, Ivan & Strbac, Nada & Zivkovic, Zivan & Kovacevic, Renata & Šteharnek, Mirjana. (2007). "A potential method for arsenic removal from copper concentrates". Minerals Engineering - MINER ENG. 20. 26-33. 10.1016/j.mineng.2006.04.006.
- 3) Marsden, J. and Wilmot, J., 2007, "Sulfate-based process flowsheet options for hydrometallurgical treatment of copper sulfide concentrates." In Copper 2007, The John E. Dutrillac International Symposium on Copper Hydrometallurgy, (P.A. Riveros, D.G Dixon, D.B. Dreisinger, and M. J. Collins, Eds.), Toronto Canada, pp. 77-100
- 4) Ruiz, M., Jerez, O., Retamal, J., and Padilla, R., 2011, "Enhanced pressure dissolution of enargite using pyrite or ferrous sulfate." In Supplemental Proceedings, Vol 1, Materials Processing and Energy Materials, TMS 2011, San Diego, CA, pp. 247-254
- 5) Peacey, J., Xian-Jian, G., and Robles, E., 2004, "Copper hydrometallurgy-current status, preliminary economics, future direction and positioning versus smelting." Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 14, pp. 560–568.
- 6) Safarzadeh, M et al.: "Recent trends in the processing of enargite concentrates" in Mineral Processing & Extractive Metall. Rev., 35: 283–367, 2014
- 7) Padilla, R., Fan, Y., and Wilkomirsky, I., 2001, "Decomposition of enargite in nitrogen atmosphere" Canadian Metallurgical Quarterly, 40, pp. 335–342
- 8) Padilla, R., Aracena A. and Ruiz. M. "Reaction mechanism and kinetics of enargite oxidation at roasting temperatures" in The Minerals, Metals & Materials Society and ASM International 2012 V 43B October 2012
- 9) Safarzadeh, M., Miller, J., The pyrometallurgy of enargite: A literature update, International Journal of Mineral Processing (2016), doi:10.1016/j.minpro.2016.09.008
- 10) Komorová L., Holmstrom A. and Imris I., Vaporization of antimony from synthetic sulphosalts, Scand. J. Metall. 14(1985) pp. 103-112
- 11) Zivkovic Z., Strbac N., Zivkovic D., Grujicid D. and Boyanov B., "Kinetics and mechanism of Sb₂S₃ oxidation process", Thermochemica Acta 383 (2002) pp. 137-143

12) Padilla R., Ramírez G, Ruiz M., "High-Temperature Volatilization Mechanism of Stibnite in Nitrogen-Oxygen Atmospheres". The Minerals, Metals & Materials Society and ASM International 2010.

13) Padilla, R., Ramírez, G. & Ruiz, M.C. Metall and Materi Trans B (2010) 41: 1284. <https://doi.org/10.1007/s11663-010-9429-6>

14) Padilla R., Ruiz M.C. (2015) Behavior of Arsenic, Antimony and Bismuth at Roasting Temperatures. In: Battle T.P. et al. (eds) Drying, Roasting, and Calcining of Minerals. Springer, Cham

15) Moscoso, I., 2016. "Cloruración de antimonita (Sb_2S_3) a altas temperaturas en ambiente oxidante". Memoria de título, Departamento de Ingeniería Metalúrgica, Universidad de Concepción.

16) Padilla, R. Moscoso, I & Ruiz, M.C.. (2017). Stibnite Chloridizing with Calcium Chloride-Oxygen at Roasting Temperatures. 319-326. [10.1007/978-3-319-51091-0_30](https://doi.org/10.1007/978-3-319-51091-0_30).

17) Reyes, L., 2014. "Volatilización de arsénico, antimonio y bismuto desde un concentrado de cobre industrial mediante oxidación". Memoria de título, Escuela Ingeniería Química, Universidad de Concepción.

18) Moats, Michael, Wang, Shijie & Kim, Daniel. (2012). A Review of the Behavior and Deposition of Lead, Bismuth, Antimony and Arsenic in Copper Electrowinning. TMS Annual Meeting. 1-21. [10.1002/9781118364833.ch1](https://doi.org/10.1002/9781118364833.ch1).

19) Parra R., Wilkomirsky I., Parada F. and Balladares E. "Mineralochemical characterization of calcines and flue dusts during Neutral roasting of arsenic copper concentrates in the pilot plant of University of Concepción." In Conference of Metallurgists Proceedings 2014

20) Van Weert G., Van Sandwijk T., McHugh L., Zabev T. "A possible role for pyrite in the reductive pyro de-arsenification of enargite" In Conference of Metallurgists Proceedings 2014

7. Anexos

7.1 Datos para construir figuras

Tabla 6. Perfil térmico horno horizontal

Largo[cm]	Temperatura Operación 750 [C°]	Temperatura operación 550 [°C]
0	305	210
2	334	261
4	472	276
6	577	326
8	649	404
10	699	467
12	728	513
14	750	547
16	766	570
18	776	586
20	782	597
22	785	604
24	785	603
26	784	607
28	779	604
30	772	598
32	768	588
34	752	577
36	743	563
38	721	547
40	695	526
42	658	492
44	611	453
46	546	403
48	486	358
50	445	329
52	395	304
54	331	264
55	290	241

Tabla 7. Datos para construir Figura 5

Tiempo prueba [min]	% Masa perdida Prueba 1	% Masa perdida Prueba 2
0	0	0
15	7.41	7.53
20	9.78	8.91
30	5.17	6.00
45	-1.57	-1.99

Tabla 8. Datos para construir Figura 6

Tiempo prueba [min]	M1 T=600°C	M1 T=450°C	MH T=600°C	MH T=450°C
0	0	0	0	0
2	99.06	55.74	-	-
5	99.08	55.74	39	-
10	99.15	73.51	47.91	-
15	99.16	93.16	53.95	36.84
20	99.19	92.35	55.42	39.47
30	99.09	80.92	53.45	47.36

Tabla 9. Datos para construir Figura 7

Tiempo prueba [min]	Temperatura 450°C	Temperatura 500°C	Temperatura 550°C	Temperatura 600°C
0	0	0	0	0
2	4.55	6.25	8.58	10.32
5	5.96	8.74	10.50	11.24
15	7.91	10.70	11.26	13.94
20	7.86	9.27	12.30	12.52
30	8.60	7.56	6.67	10.85

Tabla 10. Datos para construir Figura 8

Tiempo prueba [min]	Temperatura 450°C	Temperatura 500°C	Temperatura 550°C	Temperatura 600°C
0	0	0	0	0
2	3.99	5.00	6.52	7.61
5	4.81	7.21	8.53	10.00
10	8.06	10.10	11.79	13.08
15	9.36	10.79	12.46	14.08
20	9.72	11.36	-	-

Tabla 11. Datos para construir Figura 9

Tiempo prueba [min]	Temperatura 450°C	Temperatura 500°C	Temperatura 550°C	Temperatura 600°C
0	0	0	0	0
2	-	-	-	8.63
5	-	4.20	6.71	9.18
10	4.59	7.29	9.73	12.43
15	5.38	9.04	11.30	12.47
20	8.20	11.02	12.72	-
30	9.50	-	-	-

Tabla 12. Datos para construir figura 10

Tiempo prueba [min]	%O ₂ =1	%O ₂ =5	% O ₂ =10
0	0	0	0
2	5.13	7.61	11.69
5	6.11	10.00	12.40
10	7.78	13.08	6.78
15	9.05	14.08	3.14
20	10.77	14.06	0.35
30	11.58	9.36	-
45	14.24	-	-

7.2 Otros difractogramas adicionales.

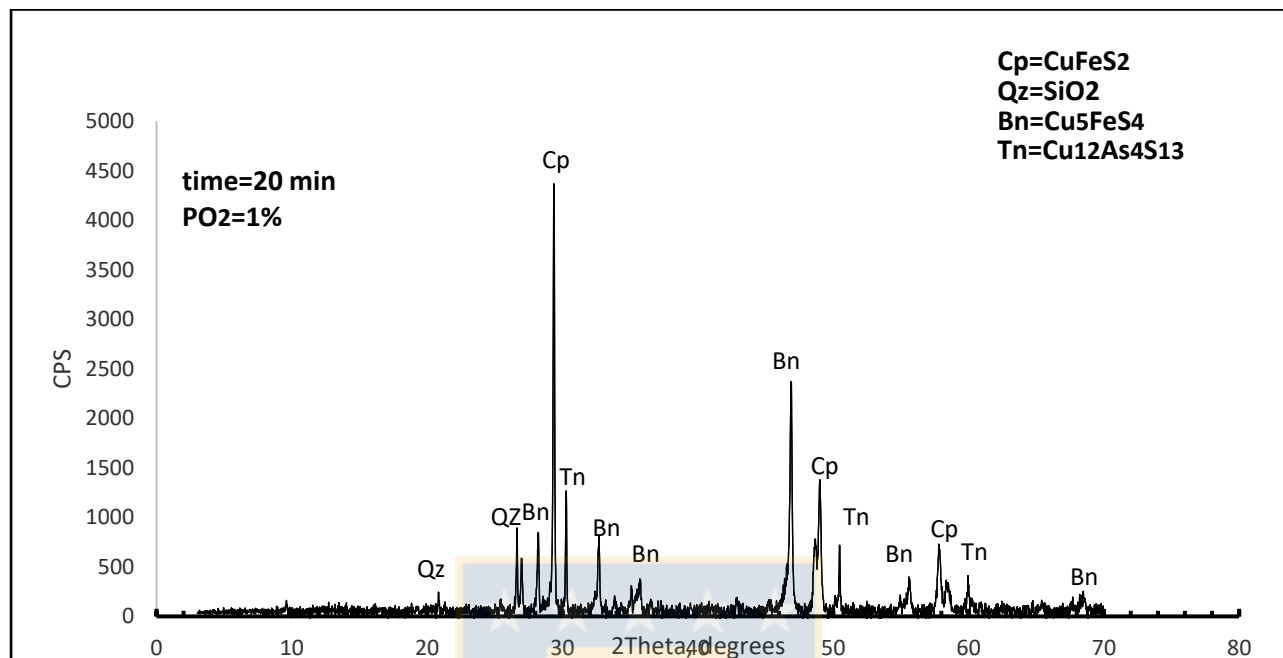


Figura 15. Difractograma de la mezcla M1 obtenida a 20 min. En 1% O₂ a 600°C

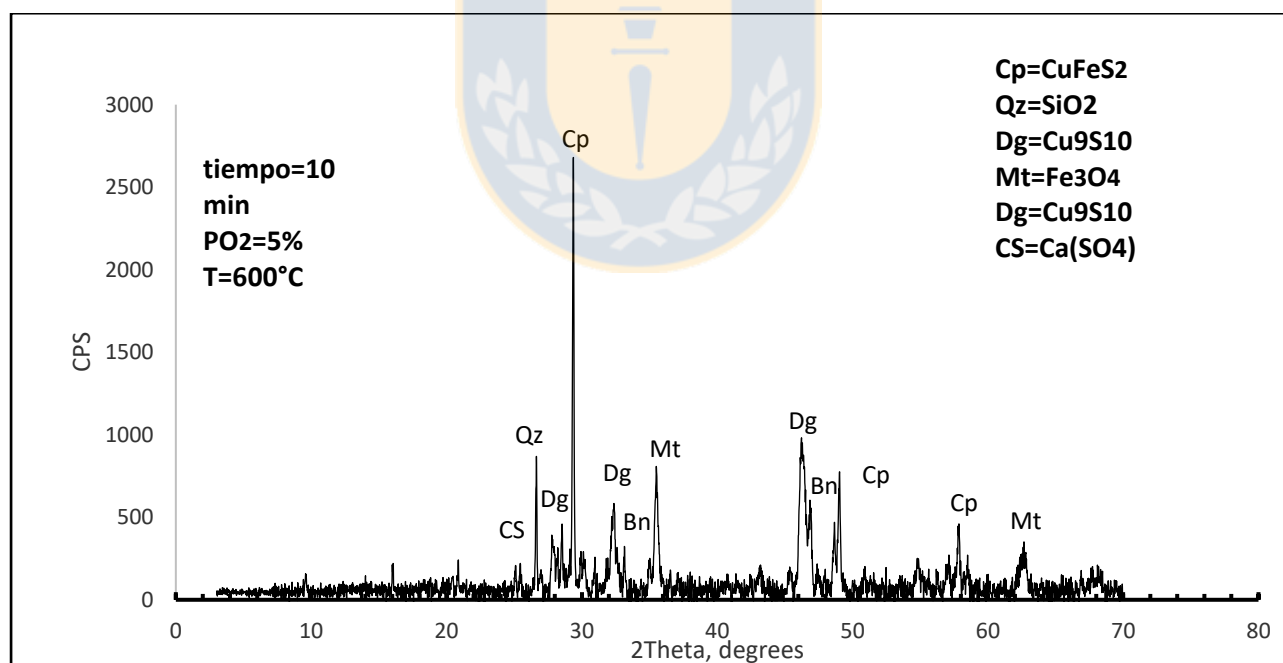


Figura 16. Difractograma de la mezcla M1 obtenida a 10 min. En 5% O₂ a 600°C

UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN – FACULTAD DE INGENIERÍA
Departamento de Ingeniería Metalúrgica
 Hoja Resumen Memoria de Título

Título: Volatilización de arsénico y antimonio desde un concentrado de cobre por cloruración	
Nombre Memorista: Galo Brito Crisóstomo	
Modalidad	Profesor(es) Patrocinante(s)
Concepto	
Calificación	
Fecha	24/11/2017
	Prof. Rafael Padilla D. Prof. María Ruiz P.
	Ingeniero Supervisor:
Prof. ^a Eugenia Araneda H.	Institución:
Comisión (Nombre y Firma)	
Prof. Fernando Parada L.	
Resumen	
<p>Arsénico, antimonio y bismuto son impurezas que se encuentran en algunos concentrados de cobre, constituyendo minerales como la enargita (Cu_3AsS_4), tenantita ($\text{Cu}_{12}\text{As}_4\text{S}_{13}$), antimonita ($\text{Sb}_2\text{S}_3$) y bismutina ($\text{Bi}_2\text{S}_3$). Estas impurezas son tóxicas por lo cual deben ser eliminadas desde concentrados de cobre.</p> <p>Este es el caso de la División Ministro Hales de Codelco, en el cual sus concentrados presentan altos niveles de arsénico, mucho mayores a 0.5%, límite que la mayoría de las fundiciones ha puesto para sus concentrados, aunque algunos autores creen que este límite podría en el futuro cercano llegar a 0.3%.</p> <p>La atención más reciente está puesta en alternativas pirometalúrgicas y es bajo esta línea de investigación que se presenta este trabajo de memoria de título que se desarrolló en el marco del Proyecto FONDECYT # 1150339.</p> <p>En este trabajo se estudió la cloruración de un concentrado industrial proveniente de la División Ministro Hales (CODELCO), con cloruro de calcio a temperaturas de 450-600°C, realizando pruebas a tiempos fijos en un horno horizontal, utilizando diversas mezclas de concentrado/cloruro de calcio y diversas composiciones de gases para insuflar al horno.</p> <p>Los resultados obtenidos en este trabajo, indican que una mezcla clorurada puede perder hasta un 14% de su peso, a 600°C y bajo una atmósfera de 5% oxígeno, correspondiente a la volatilización de los minerales principales en el concentrado que contienen arsénico y antimonio. Estos resultados indican que antimonio puede ser volatilizado sobre 99% a 600°C en una atmósfera 5% de oxígeno.</p>	