



UNIVERSIDAD DE TALCA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL DE MINAS

EVALUACIÓN DE HORNOS DE LECHO FLUIDIZADO PARA MOLIBDENO USANDO HERRAMIENTAS DE SIMULACIÓN

**MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO
DE INGENIERO CIVIL DE MINAS**

RAÚL ALEJANDRO URETA OTERO

PROFESOR GUÍA:

MANUEL REYES JARA

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:

CARLOS MORAGA CRUZ

FRANCISCO RIVAS SALDAÑA

CURICÓ - CHILE
2020

CONSTANCIA

La Dirección del Sistema de Bibliotecas a través de su encargado Biblioteca Campus Curicó certifica que el autor del siguiente trabajo de titulación ha firmado su autorización para la reproducción en forma total o parcial e ilimitada del mismo.



UNIVERSIDAD DE TALCA
DIRECCIÓN
SISTEMA DE BIBLIOTECAS

UNIVERSIDAD DE TALCA
SISTEMA DE BIBLIOTECAS
CAMPUS CURICO

Curicó, 2023

RESUMEN

Para el desarrollo de esta memoria se escogió un tema específico y se describió el estudio para el proceso de confección de un horno de lecho fluidizado para el tostado de molibdenita. Uno de los problemas de la tostación de la molibdenita es la inestabilidad de la temperatura en esta, es por esto que se trabajó con la simulación de un horno de lecho fluidizado, ya que, en este horno es posible trabajar con una temperatura relativamente constante.

En una primera etapa dieron a conocer en detalle los factores que influyen en el proceso de tostación del molibdeno, esto permitió estimar el comportamiento del fluido y el fenómeno del mismo dentro del horno. Todo este documento es solo un estudio de los procesos, con estimaciones en base a información recopilada de otros estudios y de las características del elemento, además de las modelaciones en un software de Ecuaciones de Derivadas Parciales (EDP) que se realizaron variando el flujo de calor general que se le aplicó al horno.

Los resultados que se obtuvieron reflejan claramente que a un flujo entrante de calor general de 3200 W/m^2 , es posible mantener el concentrado a una temperatura bastante estable de 920 K, que es la temperatura que la molibdenita se oxida a una mayor proporción.

Se cumplió el propósito de investigación, ya que, se encontró la manera de llegar a la temperatura deseada de tostación en horno de lecho fluidizado, este estudio permitirá como base para investigaciones futuras como; detallar la geometría de este horno, estudiar la cinética de tostación de una partícula de molibdenita en hornos de lecho fluidizado como también la simulación de un flujo continuo de alimentación de concentrado, entre otras cosas.

ABSTRACT

For the development of this report a specific topic was chosen and the study for the process of making a fluidized bed oven for molybdenite roasting was described. One of the problems of roasting molybdenite is the instability of the temperature in it, which is why we worked with the simulation of a fluidized bed furnace, since in this furnace it is possible to work with a relatively constant temperature.

In a first stage, the factors that influence the roasting process of the molybdenum were known in detail, this allowed to estimate the behavior of the fluid and the phenomenon of it inside the furnace. This entire document is only a study of the processes, with estimates based on information gathered from other studies and the characteristics of the element, in addition to the models in a software of Partial Derivative Equations (PDE) that were made by varying the general heat flow that was applied to the furnace.

The results obtained clearly reflect that at a general heat input flow of 3200 W/m^2 , it is possible to maintain the concentrate at a fairly stable temperature of 920 K, which at the temperature that molybdenite oxidizes at a higher proportion.

The research purpose was fulfilled, since it was found the way to reach the desired roasting temperature in a fluidized bed furnace. This study will allow as a base for future investigations such as; detailing the geometry of this furnace, studying the roasting kinetics of a molybdenite particle in fluidized bed furnaces as well as the simulation of a continuous feed flow of concentrate, among other things.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, quería dar las gracias a mi familia por darme la oportunidad y las facilidades económicas para estudiar una carrera profesional, mi madre, mi padre, hermano y tías. También agradecer a mis compañeros de clases, los cuales fueron muy importantes en los resultados académicos, ya que siempre nos apoyábamos unos a otros con el fin de que a todos nos fuera bien, al Paul, Toledo, Chico, Casillas, Andrés, Palominos, palomo, beta, Joaquín, Susy, Julia, ya que, todos me apoyaron de manera incondicional.

Quiero agradecer de manera especial a mi hijo que llevo a alegrarme la vida, a mi tía viviana que me dejo a la mitad de la carrera y me apoyo para ser un hombre de bien.

Y, por último, agradecer a profesor guía, profesor Manuel Reyes que creyó en mí y confió en mis capacidades, el cual estuvo siempre conmigo y me daba ánimos de avanzar con esta memoria.

*Dedicado a mi hijo, mis
padres, hermano, sobrinos, y
tías....*

ÍNDICE

RESUMEN	i
ABSTRACT	ii
AGRADECIMIENTOS	iii
ÍNDICE	v
1 INTRODUCCIÓN	1
1.1 PROBLEMATIZACIÓN	2
1.2 OBJETIVO GENERAL	3
1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	3
2 MARCO TEÓRICO.....	4
2.1 METALURGIA EXTRACTIVA	4
2.2 PIROMETALURGIA	4
2.3 MOLIBDENITA	4
2.3.1 Propiedades de la molibdenita	5
2.4 MOLIBDENO	5
2.4.1 Demanda de molibdeno	5
2.4.2 Producción de molibdeno en Chile.....	7
2.5 TOSTACION	9
2.5.1 Tostación de la molibdenita	9
2.5.2 Reacción de tostación de la molibdenita.....	9
2.6 HORNO DE PISOS MÚLTIPLES	10
Desventajas del horno de pisos múltiples	11
2.7 HORNO DE LECHO FLUIDIZADO	12
2.8 LECHO FLUIDIZADO	13
2.9 HORNOS	13
2.9.1 Horno rotatorio	13
2.10 SIMULACIÓN	15
2.10.1 Simulación en minería	15
3 METODOLOGÍA	17
3.1 ELECCION DEL SOFTWARE	18
3.2 SELECCIÓN DE PARAMETROS	18
3.3 GEOMETRÍA	19

3.4	MODELADO EN SOFTWARE DE ECUACIONES DE DERIVADAS PARCIALES	20
4	RESULTADOS Y ANÁLISIS	22
	4.1.1 T= 690 K.....	35
	4.1.2 T= 790 K.....	36
	4.1.3 T= 850 K.....	37
	4.1.4 T= 920 K.....	38
	4.1.5 T= 1000 K.....	39
5	CONCLUSIONES	40
6	RECOMENDACIONES	41
	BIBLIOGRAFIA	42

TABLA DE FIGURAS

Figura 1: Determinantes relevantes en el consumo de molibdeno, 2008-2017.....	6
Figura 2: Porcentaje de consumo del molibdeno por país, 2017.....	7
Figura 3: Porcentaje de consumo del molibdeno por producto/uso final, 2017	7
Figura 4: Producción por empresa enero-octubre de cada año, miles de TM.	8
Figura 5: Variación producción por empresa enero-octubre 2017.....	8
Figura 6: Diagrama de estabilidad termodinámica.	10
Figura 7: Hornos de pisos múltiples.	11
Figura 8: Horno de lecho fluidizado	12
Figura 9: Horno rotatorio calor directo	14
Figura 10: Horno rotatorio calor indirecto.	15
Figura 11: Geometría horno de tostación para molibdenita (elaboración propia)..	19
Figura 12: Temperatura (K) y flujo de calor total (elaboración propia).....	22
Figura 13: Geometría del lecho fluidizado.	23
Figura 14: Temperatura v/s longitud de arco (elaboración propia).	23
Tabla 15: Temperatura (K) y flujo de calor total (elaboración propia).....	24
Figura 16: Temperatura v/s longitud de arco (elaboración propia).	25
Figura 17: Temperatura (K) y flujo de calor total (elaboración propia).....	26
Figura 18: Temperatura v/s longitud de arco (elaboración propia).	27
Figura 19: Temperatura (K) y flujo de calor total (elaboración propia).....	28
Figura 20: Temperatura v/s longitud de arco (elaboración propia).	28
Figura 21: Temperatura (K) y flujo de calor total (elaboración propia).....	29
Figura 22: Temperatura v/s longitud de arco (elaboración propia).	30
Figura 23: Temperatura (K) y flujo de calor total (elaboración propia).....	31
Figura 24: Temperatura v/s longitud de arco (elaboración propia).	32
Figura 25: Temperatura (K) y flujo de calor total (elaboración propia).....	33
Figura 26: Temperatura v/s longitud de arco (elaboración propia).	34
Figura 27: Diagrama de estabilidad Mo-S-O a 690 K (elaboración propia).	35
Figura 28: Diagrama de estabilidad Mo-S-O a 790 K (elaboración propia).	36
Figura 29: Diagrama de estabilidad Mo-S-O a 850 K (elaboración propia).	37
Figura 30: Diagrama de estabilidad Mo-S-O a 920 K (elaboración propia).	38
Figura 31: Diagrama de estabilidad Mo-S-O a 1000 K (elaboración propia).	39

1 INTRODUCCIÓN

La minería es un campo que es la base para cualquier proceso productivo de cualquier rubro, ya que se obtienen las materias primas para todas las tecnologías existentes. Por esto mismo existe una amplia gama de estudios que se pueden efectuar, ya sea de procesos, materiales, aplicaciones, tecnologías y un sinnúmero de temas más.

En la presente investigación se refiere a una simulación de un horno de lecho fluidizado para molibdenita utilizando un software de Ecuaciones de Derivadas Parciales (EDP), esto se logra a través de una modelación de una geometría de un horno de lecho fluidizado a la cual se le aplican diversas físicas al modelo.

La problemática en la cual se desarrolló este estudio fue la falta de inestabilidad de la temperatura al momento del proceso de tostación de la molibdenita en hornos de pisos múltiples, es por esto que se presentó la idea de implementar la tostación de esta especie en hornos de lecho fluidizado para poder lograr una estabilidad de la temperatura para así, no tener mayores pérdidas de material y hacer más sencillo el proceso.

Una vez que se conoce el material, se modeló el horno según sus especificaciones y los resultados que se desean obtener, y para ello es necesario estudiar la fenomenología fisicoquímica de éste utilizando modelación con Ecuaciones en Derivadas Parciales (EDP); las ecuaciones que se modelan son las correspondientes a flujos de masa y calor.

Con el fin de encontrar una solución a la estabilidad de la temperatura, este trabajo se centró en el estudio del flujo entrante de calor general, para así, alcanzar las temperaturas deseadas para la oxidación de la molibdenita a la altura donde se encuentra el lecho, considerando propiedades físicas y químicas de este.

1.1 PROBLEMATIZACIÓN

Lo que busca este estudio es el desarrollo de una tecnología con más avances para el tostado de la molibdenita, ya que actualmente este proceso ocurre en hornos de pisos, proceso bastante rudimentario y que puede presentar fallas en su funcionamiento.

La opción que se estudiará es el uso del horno de lecho fluidizado, ya que esta tecnología a lo largo de la historia ha sido modificada con diversos desarrollos que permiten su adaptación a distintos tipos de metales, mejorando la eficiencia de la tostación de las partículas que se vayan a tratar

Lo esencial es estudiar si es posible efectuar el proceso de tostación de molibdenita en un horno de lecho fluidizado, esto en base a que pueda solucionar cualquiera de las carencias que actualmente presenta el horno de pisos múltiples (Tamayo Escobar, 2015) (utilizado para esta actividad):

- Falta de contacto de gas-partícula en el proceso, generando una cantidad considerable de pérdidas de material.
- Tiempo excesivo de tostación.
- Las partes metálicas no protegidas (palas, brazos, etcétera) están expuestas a una alta corrosión, por ello su cambio es constante inhabilitando en muchos casos al horno.
- El sistema móvil del horno de pisos múltiples es de alta complejidad.
- El control de temperatura es casi imposible existiendo una gradiente entre piso y piso.
- El costo de la tostación es alto, variando entre 15 y 30 cUS\$ por tonelada de concentrado.
- Se mantiene un estado de no equilibrio durante el proceso de tostación, pues hay una variación de la temperatura y la composición de los gases de un punto a otro del reactor que contribuye enormemente a esta situación.

La finalidad es estudiar si es posible tostar la molibdenita en este tipo de hornos, se pretende optimizar la tecnología mejorando cualquier variable de las recién expuestas: reduciendo los tiempos de tostado, posiblemente reduciendo las dimensiones del horno, permitiendo realizar mantenciones sin que el mismo deje de funcionar en su totalidad, disminuyendo pérdidas de partículas, emisiones de SO_2 entre otras.

1.2 OBJETIVO GENERAL

Evaluar la factibilidad de utilizar un horno de lecho fluidizado para concentrados de molibdenita, utilizando herramientas de simulación con Ecuaciones en Derivadas Parciales, con el fin de encontrar estabilidad térmica.

1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Identificar las variables que pueden facilitar la tostación de molibdenita para obtener una situación lo más realista posible.
- Definir los componentes de un horno de lecho fluidizado para identificar los más relevantes que influyen en el proceso de tostación.
- Evaluar si el horno de lecho fluidizado permite la tostación de molibdenita con el fin de implementar un nuevo método e innovar en el área de la pirometalurgia.

2 MARCO TEÓRICO

2.1 METALURGIA EXTRACTIVA

Para la metalurgia extractiva se consideran dos vías, operaciones pirometalúrgicas y operaciones hidrometalúrgicas, la primera se caracteriza por trabajar a altas temperaturas con productos en estado sólido, líquido y gaseoso, mientras que la segunda se caracteriza por el trabajo por vía húmeda, que se enfoca en reacciones de fase acuosa y a bajas temperaturas (Baena, Bustamante Rúa, & Gaviria Cartagena, 2008).

2.2 PIROMETALURGIA

La vía pirometalúrgica trabaja a temperaturas elevadas, lo que con lleva ciertas ventajas para la extracción de interés, las cuales son (Baena, Bustamante Rúa, & Gaviria Cartagena, 2008):

- Logros en cambios químicos y estructurales considerables en el metal de interés.
- Velocidad de reacciones químicas y transporte de masas, lo que permite la optimización del tiempo.
- En la fase líquida y gaseosa a altas temperaturas con lleva la separación de las fases se realice con mayor facilidad.

2.3 MOLIBDENITA

La molibdenita (MoS_2) corresponde a un mineral sulfurado y su composición corresponde a un 60% de molibdeno y un 40% azufre, por otra parte, su composición puede estar compartida con hasta 0.3% de renio. La génesis de este mineral son los yacimientos hidrotermales altas temperaturas, los minerales que se asocian a la molibdenita son la pirita, calcopirita, cuarzo, anhidrita, fluorita y sheelita (Vásquez Zamora, 2015).

La molibdenita en mayor parte se encuentra junto al Cu en la etapa de flotación, dando como resultado concentrado mixto de Cu y Mo, luego, se envía a una

flotación selectiva en donde se obtienen concentrados por separados de Cu y Mo, el cual el segundo concentrado va a fusión (Acuña Iver , 2012)

2.3.1 Propiedades de la molibdenita

Las propiedades de la molibdenita son:

- Flexibilidad.
- Resistencia al desgaste, lo que disminuye la fricción con otras piezas.
- Resistencia a la corrosión y a altas temperaturas.
- Durabilidad, por ende, se ve influenciado en la industria siderúrgica.
- Lubricante, es por esto que se ve involucrada en la fabricación de lubricantes.

Todas estas propiedades hacen que este mineral se ve involucrado en diversas áreas de las industrias de la construcción, electrónica, automotriz, entre otros. (Vásquez Zamora, 2015).

2.4 MOLIBDENO

El molibdeno es un metal de transición, el cual pertenece al grupo 6 de la tabla periódica con número atómico de 42, es de color plateado y posee una dureza de Mohs de 5.5 (Arrebola, 2019).

El molibdeno es muy conveniente para la fabricación de aceros, ya que le proporciona diversas aleaciones, tales como, la resistencia mecánica y el endurecimiento cuando este se somete a temperaturas críticas. En nuestro entorno es posible encontrar el molibdeno en yacimientos mineros asociados a la molibdenita, encontrándose con mayor repetición en yacimientos tipo pórfidos de cobre (CuS_2) (Bazán, Brandaleze, & Colque, 2013).

2.4.1 Demanda de molibdeno

Existen diversas áreas donde el molibdeno es esencial, principalmente existen dos sectores: el metalúrgico y el químico. En el área metalúrgica se usa como distintas aleaciones del acero, mejorando diversas características de este como lo es la resistencia, corrosión y mejora la fragilidad frente a temperaturas y expansión térmica. En el área química el molibdeno se utiliza en aplicaciones catalíticas, como, por ejemplo, reacciones de hidro-desulfuración en la industria del petróleo y el gas,

además en otros usos menores el revestimiento y lubricantes en estado sólido (CRU, 2018).

Por otra parte, el consumo de molibdeno está totalmente ligado al crecimiento de la industria del acero, como se ve evidenciado en la figura 1.

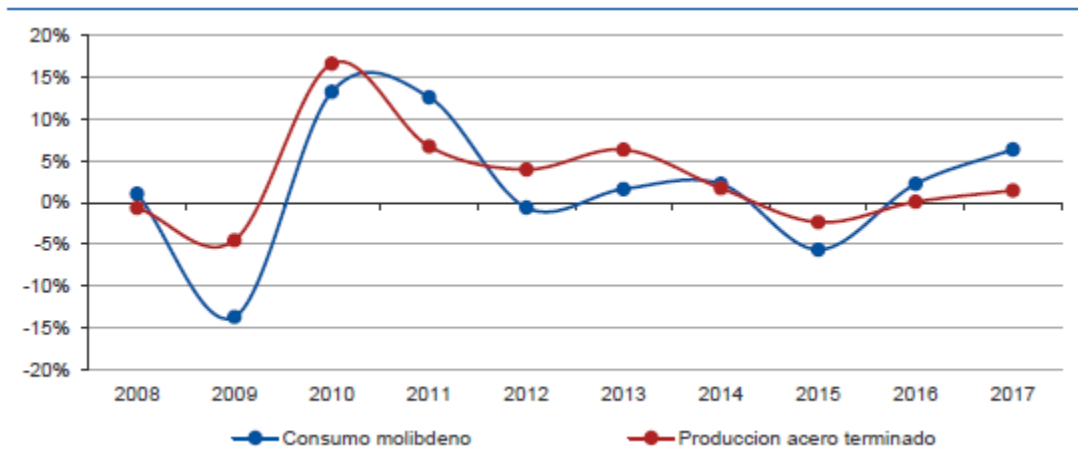


Figura 1: Determinantes relevantes en el consumo de molibdeno, 2008-2017

Fuente: CRU (2018).

Los sectores usuarios del molibdeno son:

- Industria del petróleo y gas, el mayor consumidor a nivel mundial.
- Químicos y petroquímicos, en la construcción de plantas químicas, de plásticos y farmacéuticas.
- Industria automotriz, para dar resistencia en sus materiales y anticorrosividad.
- Ingeniería mecánica, fabricación de herramienta y equipos de aceros.
- Generación de energía, necesita de varios productos de acero.
- Industrias procesadoras, utilizan equipos con contenido de acero.
- Construcción, usan aleaciones de acero para estructuras.
- Aeronáutica y defensa, en super aleaciones con molibdeno para resistir temperaturas extremas.
- Electrónica y medicina, fabricación de tecnología, como, pantallas, equipos de iluminación y equipos de rayos X.

A continuación, en la figura 2 se muestra la demanda de molibdeno en diversos países y el resto del mundo para el año 2017:

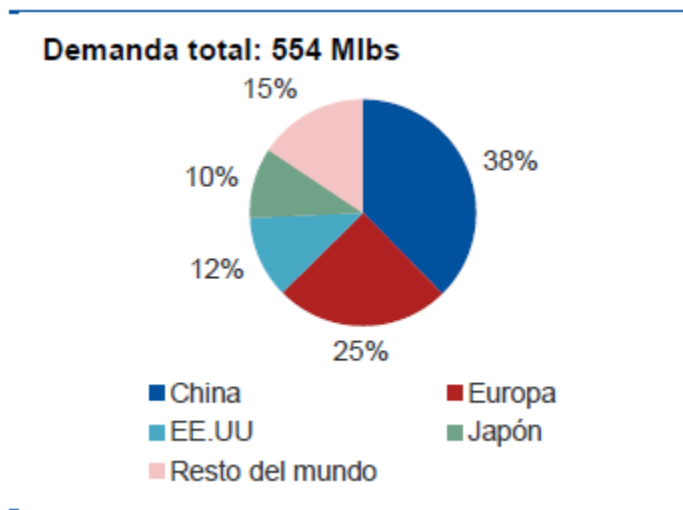


Figura 2: Porcentaje de consumo del molibdeno por país, 2017

También es posible apreciar la demanda total de molibdeno según su uso en la industria para el año 2017, como se ve en la figura 3:

Fuente: CRU (2018).

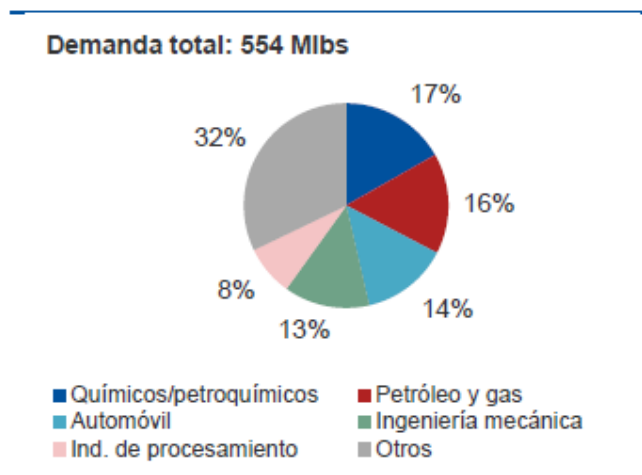


Figura 3: Porcentaje de consumo del molibdeno por producto/uso final, 2017

fuentes: CRU (2018).

2.4.2 Producción de molibdeno en Chile

En nuestro país existen 7 operaciones mineras de cobre que producen molibdeno como subproducto, entre las cuales se encuentra Codelco, Pelambres, Collahuasi, Anglo American, Valle Central, Sierra Gorda y Caserones. La producción de concentrados de molibdeno en el periodo de enero-octubre de 2017 alcanzó un alza del 10.7% totalizando 52 mil TM en relación con el año anterior (COCHILCO, 2017).

A continuación, se muestra la producción por empresa entre el período enero-octubre de los años 2016 y 2017.

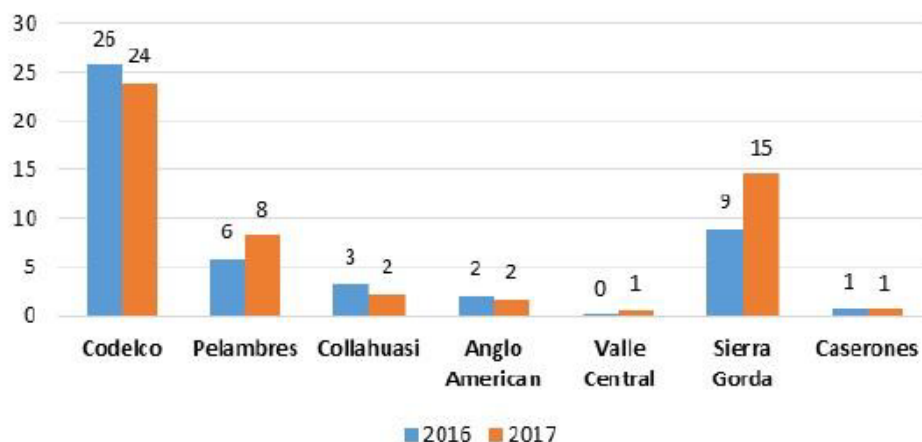


Figura 4: Producción por empresa enero-octubre de cada año, miles de TM.

Fuente: COCHILCO (2017).

La producción de molibdeno de enero a octubre del año 2017 se muestra en la figura 5, en donde se puede apreciar la variación a nivel nacional y la variación a nivel yacimiento, en donde los pelambres supera por mucho a las otras.

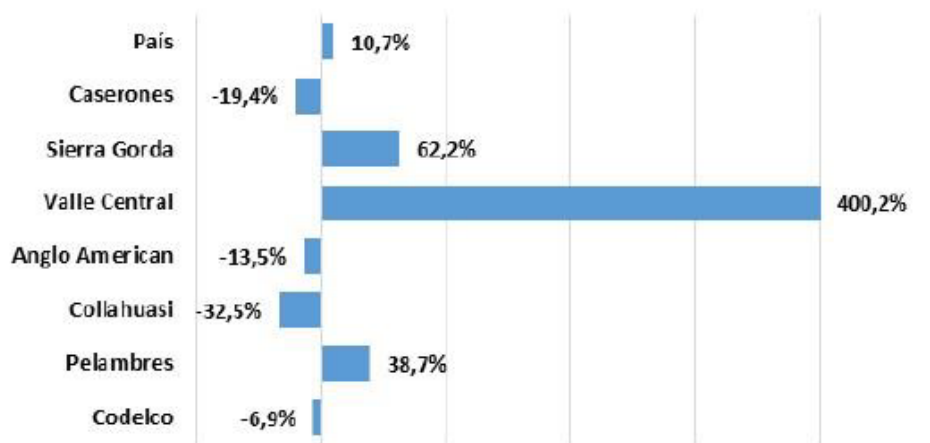


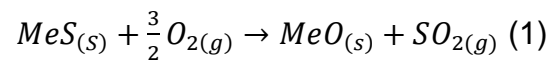
Figura 5: Variación producción por empresa enero-octubre 2017.

Fuente: COCHILCO (2017).

2.5 TOSTACIÓN

La tostación es un proceso en el cual ocurre una transformación en la composición química de un mineral, todo esto se lleva a cabo exponiendo el mineral a altas temperaturas, pero sin llegar a fundir el mineral. En este proceso su fin no es eliminar material, sino, que transformar este, la tostación pirometalúrgica consiste en oxidar menas sulfuradas para prepararlas para los procesos siguientes en la cadena de extracción de un mineral de interés (Marin, Utigard, & Hernandez, 2008).

El modelo físico-químico que representa la tostación de un sulfuro metálico puede expresarse de la siguiente forma:



En donde un mineral sulfurado es expuesto a temperatura y a gran cantidad de oxígeno, en donde ocurre la reacción y como resultado se obtiene la oxidación del mineral y una gran liberación de SO_2 , el cual puede ser tratado para no exponerlo al medio ambiente y ser de provecho a la minería (Marin, Utigard, & Hernandez, 2008).

2.5.1 Tostación de la molibdenita

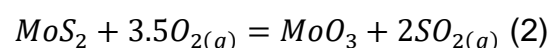
Generalmente la tostación de la molibdenita ocurre cuando se expone entre los 500 y 650°C de temperatura, a esto hay que sumarle que la atmosfera este sometida a bajas concentraciones de SO_2 y altas en O_2 , lo que produce alta probabilidad de estabilidad en la fase de MoO_3 (Hernández Ibañez , 2008).

Para la producción del trióxido de molibdenita (MoO_3) se requieren una serie de reacciones químicas exotérmicas, es por esto que una buena determinación de la cinética de tostación de los concentrados es de gran importancia para satisfacer la demanda existente en la actualidad de productos que incorporan el molibdeno (Bazán, Brandaleze, & Colque, 2013).

Es necesario un control de temperatura minucioso, ya que, el trióxido de molibdeno (MoO_3) volatiliza fácilmente a las condiciones que pueden generarse en la tostación, esto empieza a ocurrir a los 620°C (Hernández Ibañez , 2008).

2.5.2 Reacción de tostación de la molibdenita

Para que la molibdenita se oxide a MoO_3 debe ocurrir la siguiente reacción:



$$\Delta H^{\circ}298K = -1062.1 \text{ kJ/mol} \quad (3)$$

$$\Delta G^{\circ}298K = -1000.5 \text{ kJ/mol} \quad (4)$$

Estas ecuaciones (2,3,4) representan la formación directa del MoO_3 , existe la formación indirecta, pero no se profundizará en el estudio de este documento (Hernández Ibañez , 2008)

Para verificar la estabilidad termodinámica de las especies Mo, O, S , se requiere calcular un diagrama de estabilidad, en este caso a 873 K, para aquello se tomó en consideración, Mo, MoS_2, MoO_2, MoO_3 , además de añadir todos los óxidos que pudieran formarse en fases intermedias (Marin, Utigard, & Hernandez, 2008).

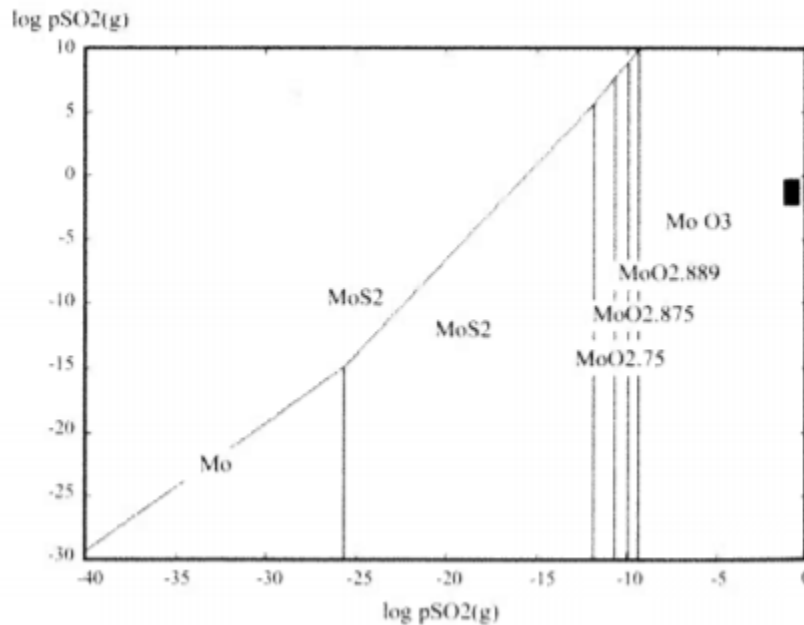


Figura 6: Diagrama de estabilidad termodinámica.

Fuente: (Marin, Utigard, & Hernandez, 2008)

En la figura 6, consta en mostrar las zonas en donde es más probable que ocurra cierta especie dependiendo de las presiones parciales de O_2 y SO_2 a una temperatura constante.

2.6 HORNO DE PISOS MULTIPLES

Estos hornos están recubiertos con material refractario, consta de múltiples niveles que oscilan entre 12 a 16 metros y su diámetro consta de 6 a 7 m. posee un eje central entre 0.29- 0.87 rpm, quemadores a gas que se encuentran en solo algunos

niveles, pero en la mayoría operan solo los tres últimos (Riveros, 2009). Este horno posee un sistema de trabajo e inspección de los niveles, que son puertas en sus paredes para solucionar algún estancamiento y ver si el material circula de manera adecuada. Además, tiene dos ductos de salidas de gases en ambos extremos (Riveros, 2009).

A continuación, se muestra un horno de pisos múltiples, en donde es posible identificar su alimentación por la parte superior, las salidas de gases, sus respectivos pisos, las paletas de distribución, entre otros.

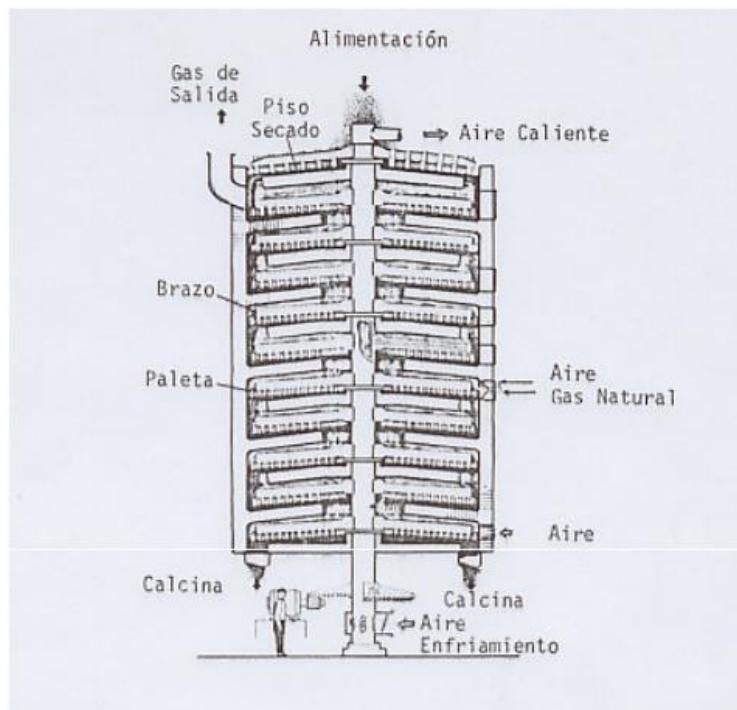


Figura 7: Hornos de pisos múltiples.

Fuente: Riveros (2009).

Desventajas del horno de pisos múltiples (Tamayo Escobar, 2015).

- Alta corrosión que están expuestos los accesorios, tales como palas, brazos, etc.
- La complejidad del sistema móvil que hace operar los brazos y que genera la circulación del material que baja por el horno.
- Control de temperatura en los diferentes niveles, que es muy difícil por los diferentes gradientes entre piso y piso.

- Antigüedad, falta de autonomía, ya que presenta métodos muy rudimentarios para su ejecución, lo que con lleva el gran uso de mano de obra para la supervisión y cuando este presenta algún problema.

2.7 HORNO DE LECHO FLUIDIZADO

El horno de lecho fluidizado consta básicamente de un cilindro vertical de acero, el cual contiene un lecho de partículas medianamente gruesas, las que mediante la inyección de aire o gas son puestas en suspensión (Vazquez & Pedraza, 1982).

Este método genera una excelente transferencia de calor y masa, el intercambio de calor ocurre cuando las partículas son puestas en suspensión mediante un flujo caliente, la energía es obtenida en las partículas y luego esta se cede en forma de calor a través de todo el lecho (Valle Núñez, 2005).

Como ya se mencionó anteriormente, este horno corresponde a un cilindro vertical, compuesto principalmente por elementos refractarios, lo cual, permite que el lecho fluidizado alcance temperaturas sobre los 700 °C.

A continuación, se muestra un esquema explicativo:

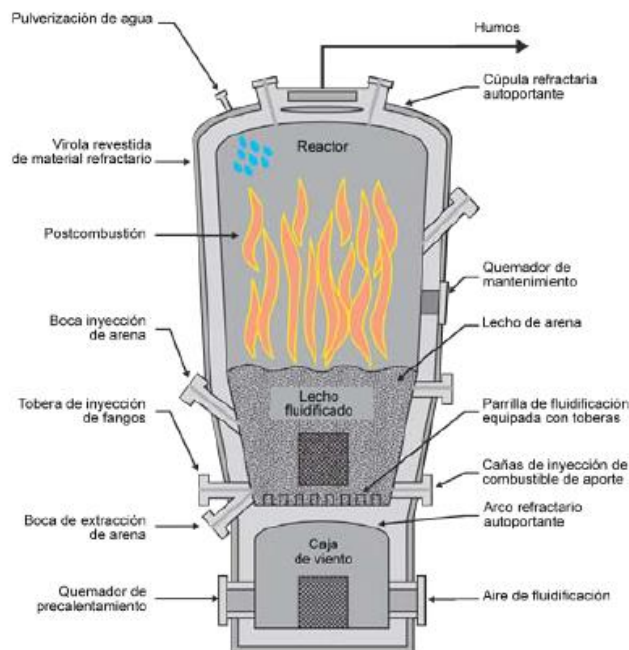


Figura 8: Horno de lecho fluidizado

Fuente: Degremont (2011)

2.8 LECHO FLUIDIZADO

Cuando una cantidad indefinida de partículas es puesta en suspensión mediante un flujo ascendente, comportándose como un líquido, recibe el nombre de lecho fluidizado (Nuñez, 2005). Las partículas que se encuentran en el lecho son generalmente gruesas, estas partículas son puestas en movimiento por medio de un chorro de gas en la parte central de la base del cilindro (horno), lo cual genera una ascensión de estas, depende de la velocidad de la inyección del flujo, que tan rápido subirán las partículas por el centro del horno. Luego de alcanzar la altura máxima, estas partículas caen por la región anular del horno, donde desciende creando un lecho más denso de partículas (Vazquez & Pedraza, 1982).

2.9 HORNOS

En la tostación existen hornos, los cuales varían según la aplicación de su calor, esta cualidad la poseen los hornos rotatorios, que se definen a continuación:

2.9.1 Horno rotatorio

Los hornos rotatorios consisten en un cilindro levemente inclinado y que esta sostenido por dos apoyos. Esta capacitados para la producción de alto tonelaje y son capaces de manejar productos con diversa variación en su tamaño, además su relación de longitud/diámetro es de 4/10 respectivamente y el volumen de llenado no excede el 15% (Riveros, 2009).

Existen dos tipos de hornos rotatorios, uno de calor directo y otro de calor indirecto, el primero son para productos que no son sensibles al calor y la transferencia de calor es principalmente por convección; el segundo, son aplicables a productos que son sensibles al calor, por lo que el material es calentado por la pared del horno que es calentada por combustión o vapor, la transferencia de calor ocurre por conducción (Riveros, 2009).

La figura 9 muestra el esquema de un horno rotatorio directo, en las que se destacan sus componentes como, la cámara de combustión, el quemador, sus vías de evacuación del gas y del producto oficial, entre otros.

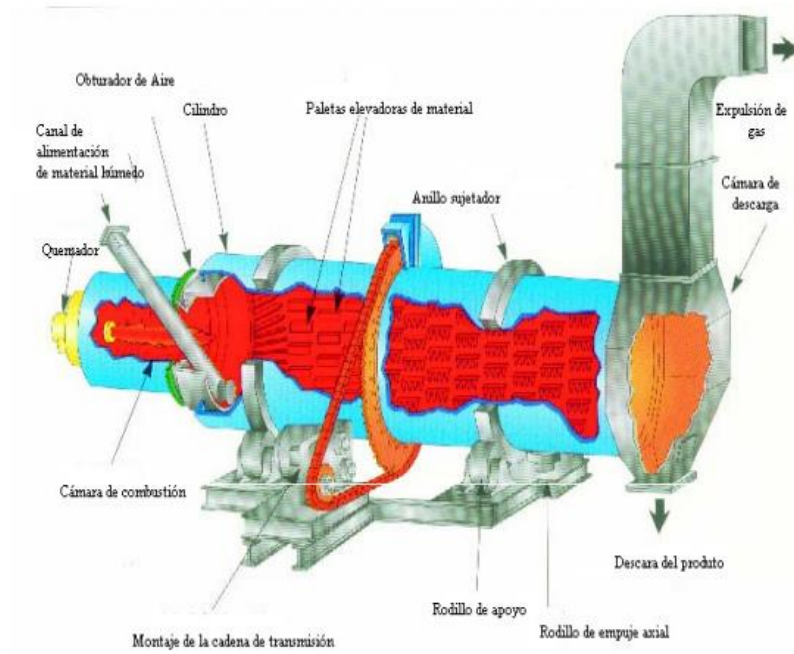


Figura 9: Horno rotatorio calor directo

Fuente: Riveros (2009).

La figura 10 muestra un esquema de un horno rotatorio de calor directo, en donde también consta de un cilindro horizontal, pero a diferencia que posee otros componentes, tales como, cámara de calor, tubos de inyección de vapor, y demás.

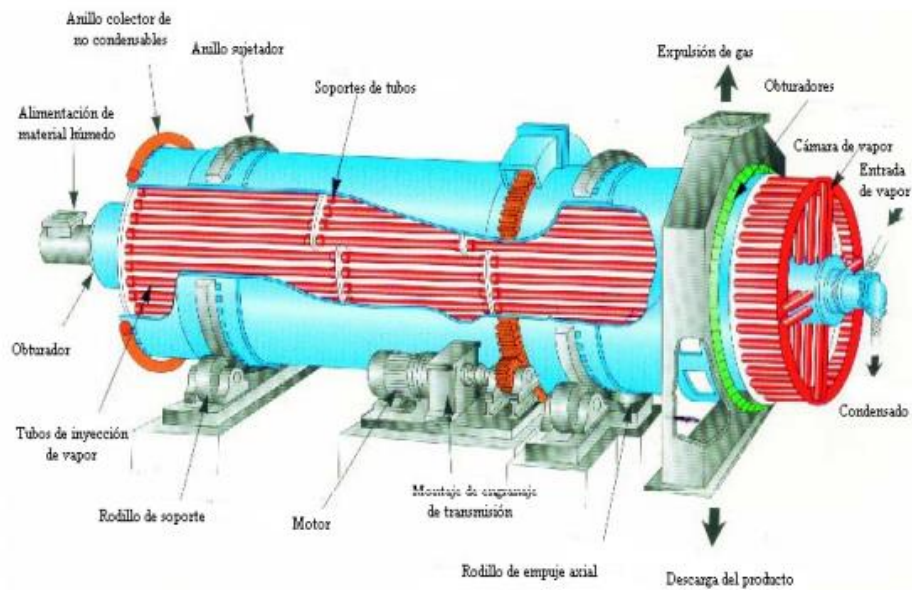


Figura 10: Horno rotatorio calor indirecto.

Fuente: Riveros (2009)

2.10 SIMULACIÓN

La acción simular consiste en representar una situación que no es real, pero fingiendo que así lo es, en lo cual puede ayudar a medir el desempeño de un equipo o un personal, además esta herramienta ayuda en algunos casos a dar experiencia de posibles situaciones a estudiantes de diversas áreas.

En la minería la simulación se hace cada vez más común, ya que, los equipos que se implementan son cada vez más complejos y requieren de experiencia para su manipulación. Además, se pueden estudiar sistemas mineros complejos, elaborar estrategias que puedan aumentar la producción y hacerlo más óptimo, también es posible poder observar el comportamiento de los equipos de los procesos unitarios que se necesitan para elaborar el producto de interés (Orellana Jara, 2018).

2.10.1 Simulación en minería

En la minería la simulación ha tomado un papel importante a la hora de tomar nuevas decisiones que vayan a favor de la innovación y optimización minera, con esto se estudian los desempeños de posibles sistemas mineros a incorporar en las

faenas, estos sistemas pueden ser de interacciones internas (comportamiento de equipos), como también un sistema de producción de un determinado proceso (Orellana Jara, 2018).

La simulación en la minería presenta diversas ventajas como también desventajas (Orellana Jara, 2018), tales como:

Ventajas de la simulación:

- Permite conocer el posible impacto de cada situación sin llevarla en realidad, esto permite ahorro en los costos además que exista la posibilidad de ser riesgoso de ejecutar.
- Fuente de conocimiento del proceso a evaluar, ya que, se analiza detalladamente y se estudian diversos escenarios.
- Herramienta decisiva a la hora de toma de decisiones.
- Permite el estudio de pequeñas variables que pueden significar un gran impacto en el resultado final.
- Existencia de software con fines de incorporar sencillez en su manipulación, por lo que no es necesario tener un gran nivel de conocimiento en la programación.
- Poseer visualización grafica del comportamiento o cambios visibles del comportamiento una vez sea estudiado.

Desventajas de la simulación:

- Alto costo de simulación al momento de tratar de resolver problemas que son parcialmente sencillos de resolver.
- La realización de una simulación completa con un alto estudio se necesita la inversión de tiempo de trabajo considerable.
- El analista que efectúe la simulación debe tener un gran conocimiento en el uso del software, además de estadísticas para la interpretación de los resultados obtenidos.

3 METODOLOGÍA

Para poder llegar a comparar los diseños de diversos hornos de tostación, es necesario poder llegar a definir y calcular el rendimiento de estos, para luego, poder modelar la geometría como domino mediante software de EDP, en este caso de transferencia de calor. Todo esto, con el fin de poder estudiar las diferentes modificaciones que se le podrían hacer a un horno de tostación para concentrados de molibdenita y así generar una mejora considerable en el trabajo del horno y obtener mejores resultados.

Pasos metodológicos

1. Definir la geometría de hornos de tostación ya existentes y seleccionar los hornos que van a ser estudiados en este proyecto.
2. Seleccionar los parámetros del horno en busca de valores, que asemejen a una situación real de tostación de concentrados de molibdenita.
3. Buscar y analizar posibles softwares de EDP, que pueda ser de mayor utilidad al analizar transferencia de calor, para así, elegir el más adecuado a la situación.
4. Elegir las EDP que modelan de mejor manera el proceso del horno de tostación.
5. Modelar el respectivo horno de tostación, mediante el software de EDP anteriormente seleccionado.
6. Analizar todos los escenarios posibles del horno y elegir el de mejor pronóstico de ellos.
7. Modificar parámetros del horno de tostación con los cuales trabajamos.
8. Modelar nuevamente con los nuevos parámetros analizados.
9. Analizar resultados obtenidos.
10. Comparar los resultados y analizar el mejor pronóstico.

Todo esto puede señalar en que se está fallando en el método de tostación de molibdenita, así poder ayudar a futuras investigaciones e idear modificaciones estructurales del horno, como sería, en geometría o en añadir accesorios.

3.1 ELECCION DEL SOFTWARE

Para la elección del software que se trabajó se consideraron ciertos aspectos como, la posibilidad de estudiar múltiples casos físicos y poder resolverlos a problemas de ingeniería, además se necesitan estudiar acoplados de sistemas de Ecuaciones de Derivadas Parciales (EDP).

Por ultimo y no menos importante, es necesario poder realizar una geometría acorde al estudio que se desarrollará, por ende, se debe necesitar un software con el que se pueda realizar de forma realista una situación de manera 3D.

Por lo tanto, el software más idóneo y el cual escogí fue COMSOL Multiphysics 5.3, el cual me permite trabajar con un modelo 3D y satisfacer la problemática incluyendo variadas físicas del tema.

3.2 SELECCIÓN DE PARAMETROS

Para que la modelación del horno de tostación se lleve a cabo de la forma mas real posible se escogieron los parámetros mas apegados a la realidad. La elección de parámetros se puede explicar en dos partes:

- En primera instancia se definió los dominios en donde se encuentra el aire el cual circula a través del lecho, además de la propiedades que posee este fluido, una conductividad térmica (k) de $5 \text{ W}/(\text{m} * \text{K})$, densidad (ρ) de $1.29 \text{ kg}/\text{m}^3$, una viscosidad dinámica (μ) de $0.00018 \text{ Pas} * \text{s}$ y una capacidad térmica a presión constante (C_p) de $1.012 \text{ J}/(\text{kg} * \text{K})$.
- Las propiedades que corresponden al lecho fluidizado son: conductividad térmica (k) de $3 \text{ W}/(\text{m} * \text{K})$, densidad (ρ) de $70 \text{ kg}/\text{m}^3$ y una capacidad térmica a presión constante (C_p) de $4 \text{ J}/(\text{kg} * \text{K})$.

No fue necesario realizar un material aparte para la creación de una pared con propiedades refractarias, ya que, en las físicas se definió un aislamiento térmico en todos los contornos de los materiales ya antes mencionados, por ende, el calor y temperatura producidas en el interior del horno no saldrán al exterior.

3.3 GEOMETRÍA

Para poder determinar una configuración de la geometría del horno de lecho fluidizado, se desarrolló un cuerpo cilíndrico al cual se le fueron haciendo diversas modificaciones para que este tuviera el mejor rendimiento posible, para así el flujo de aire entrante tuviera una óptima propagación a través de cuerpo. Cabe destacar que lo que se busca en este estudio es identificar la propagación de la temperatura a través del horno, por ende, no se desarrollará minuciosamente los detalles geométricos de este, en lo que se destaca que será un cilindro vertical, semicircular en el extremo superior y en la parte inferior con un agostamiento de 1 m, como se muestra en la figura 11.

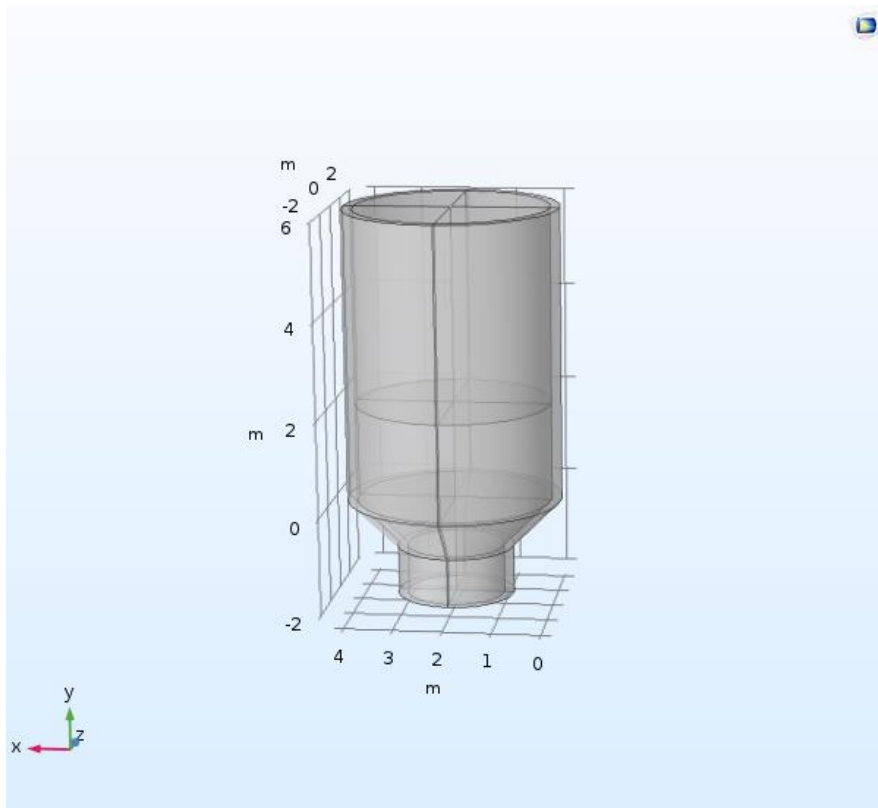


Figura 11: Geometría horno de tostación para molibdenita (elaboración propia).

Como se puede apreciar en la figura 11, para la confección de la geometría del horno se utilizó un cilindro de altura 6 m con un radio de 2 m, un cono invertido de altura 2 m y de radio inferior 1 m y por último un cilindro de altura 1 m con un radio de 2 m (las dimensiones se escogieron para modelar un horno lo más realista posible).

Hay que destacar que en la parte inferior del horno estaría la caja de viento y el plato distribuidor de aire. En la parte del cilindro interior se encuentra la zona del lecho fluidizado de altura de 2 m, que es donde ocurrirá la reacción. En la parte

superior del horno, se encuentra abierto para la salida de los gases producidos en el proceso, en donde debería estar una salida de gases contaminantes.

El horno diseñado posee una altura total de 8m de altura, en el cual se estudiará la trayectoria de la temperatura a través de este.

3.4 MODELADO EN SOFTWARE DE ECUACIONES DE DERIVADAS PARCIALES

El trabajo en este software consta de 7 pasos que serán explicados a continuación. En primera instancia se debe configurar el entorno del modelo que se desarrolló, en donde se escogió la dimensión 3D y luego se dio paso a escoger las físicas que se vieron involucradas en el problema, la transferencia de calor en sólidos es lo primordial en este caso, además de la transferencia de calor en medios porosos, por lo que, se eligieron esas dos físicas. Por otra parte, se debió escoger el estudio de trabajo que en este caso fue estacionario.

Ya con todo esto bien definido se dio paso a confeccionar la estructura geométrica del horno de tostación anteriormente definida, como se muestra en la figura 10

Una vez creada toda la estructura del horno, se definieron los materiales que se incorporaron a esta estructura, el horno en sí, está hecho de un acero testeado a temperaturas que en este proceso no se van a alcanzar (2788 K).

El paso posterior consta de configurar las físicas que en un principio se señalaron que iban a estar presentes en el proceso de tostación de la molibdenita, por defecto el software entrega diversos nodos en donde se deben modificar para que el estudio tenga la mayor similitud a la vida real, en este caso están los nodos, “sólido”, en donde se debe especificar los dominios correspondientes al sólido en el que vamos a trabajar, además de especificar la temperatura ambiente del caso, la conductividad térmica, la densidad y la capacidad térmica del respectivo sólido. También nos entrega el nodo “valores iniciales”, el cual se basa en indicar a que temperatura se encuentra el horno al momento de iniciar la reacción. Y por otra parte nos entrega el nodo “aislamiento térmico”, en donde se debe especificar qué sector del horno debe poseer la propiedad de aislamiento térmico, que en este caso es la totalidad del horno.

Como el estudio implica calor, se debe indicar una fuente de esta, en este caso la fuente de calor aplicada esta por la parte inferior del horno, por lo que, se agregó un nodo con el nombre “flujo de calor”, ya que, es un flujo de aire el cual entra y calienta el lecho a temperaturas cercanas a los 700°C, además se debe seleccionar el

dominio que tendrá este flujo y el calor general en W/m^2 que en este caso es de $5 W/m^2$, todos estos datos están ingresados en modo de prueba.

Por último, toda la geometría del horno se debe enmallar para ser analizada con la mayor precisión posible, esto corresponde al nodo "malla 1", en donde se pueden escoger diferentes grosores de esta malla, para un estudio lo más realista posible se escoge la opción "extremadamente fina" la cual hace que el estudio sea más demoroso, pero con una precisión mayor.

4 RESULTADOS Y ANÁLISIS

Los datos obtenidos de la modelación de los diferentes casos planteados, serán analizados a continuación.

Una vez que se planteó el caso de transferencia de calor más un flujo de aire entrante en el horno de lecho fluidizado, se obtuvieron los siguientes resultados:

- En la figura 12 se observa temperatura en K que se generó en el horno a través del largo de este, en donde las temperaturas varían entre 266 K y 530 K, en donde el calor de flujo entrante fue de 500 W/m^2 .

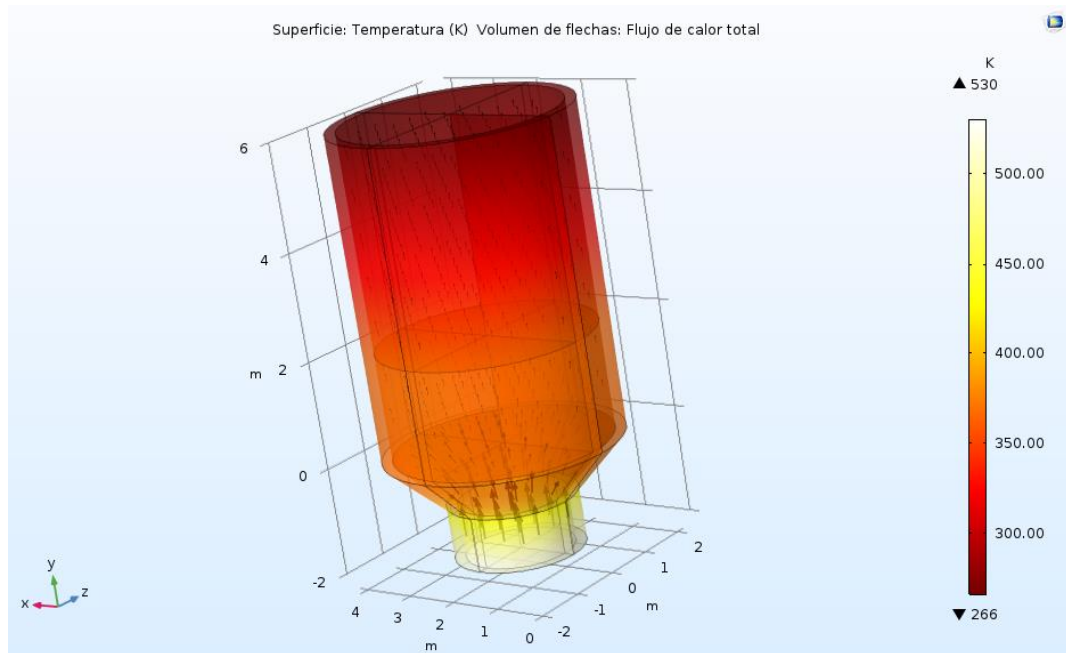


Figura 12: Temperatura (K) y flujo de calor total (elaboración propia).

- La superficie de interés de estudio se debe concentrar entre los 2 y 4 m, ya que es en ese lugar donde se encontrará el concentrado de molibdenita, como se muestra en la figura 13.

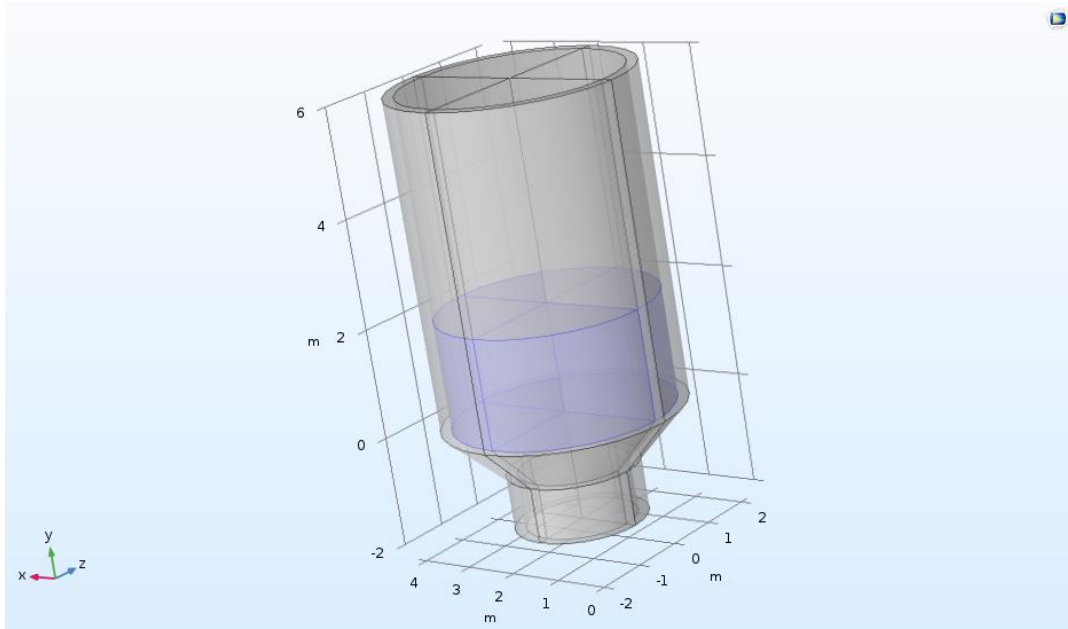


Figura 13: Geometría del lecho fluidizado.

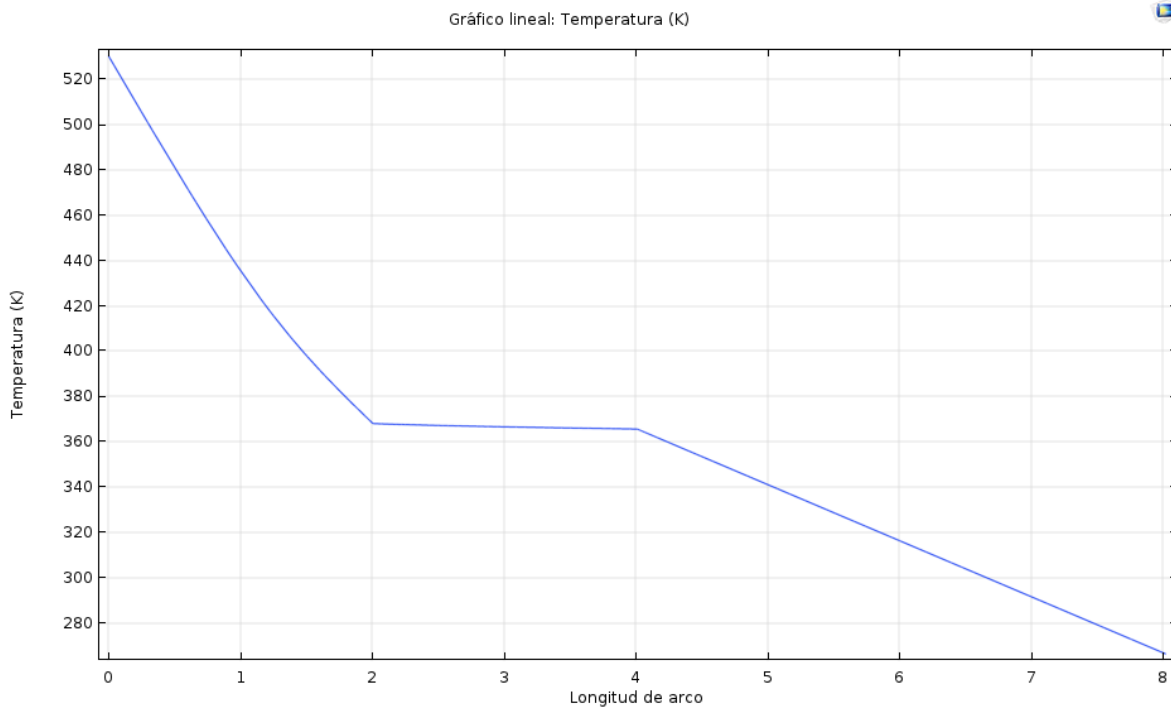


Figura 14: Temperatura v/s longitud de arco (elaboración propia).

En la figura 14 el gráfico lineal se representa la relación de temperatura (K) y la longitud del horno en cuestión, en donde se puede observar que la temperatura una vez que alcanza al concentrado de molibdenita se mantiene casi constante, esto es debido a la conductividad térmica que presenta. Como fue anteriormente mencionado la MoS_2 se oxida a temperaturas entre 500 Y 650°C (773 y 923 K), por lo que en este modelo no es posible alcanzar dichas temperaturas es necesario

empezar a variar el flujo entrante de calor general al horno y observar cual es la más adecuada para que ocurra el proceso.

Se modeló a diferentes flujos de calor, estos fueron:

Flujo entrante de calor general (W/m^2)
1600
2000
2400
2800
3200
3600

Tabla 1: Flujo entrante de calor general (W/m^2)

En los cuales se aprecian los siguientes resultados:

a) $1600 W/m^2$

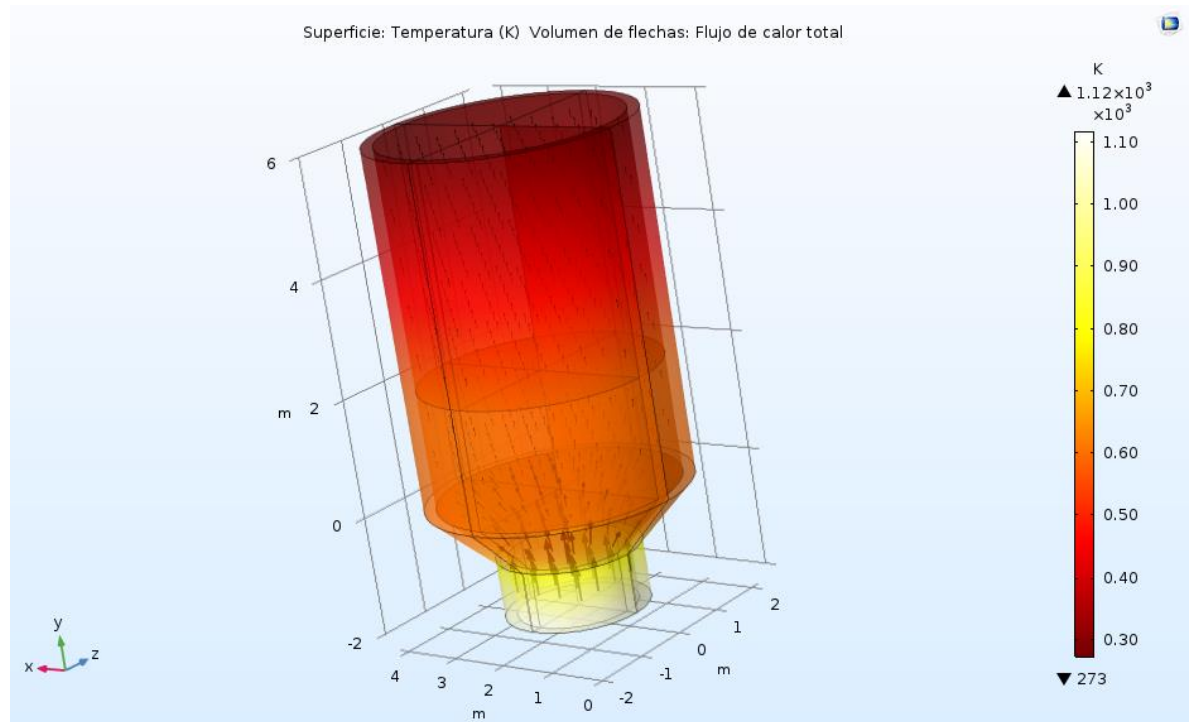


Tabla 15: Temperatura (K) y flujo de calor total (elaboración propia).

Como se aprecia en la figura 15, la temperatura se mantiene constante en la superficie donde se encuentra el concentrado, esto es debido a la conductividad calorífica que presenta este material. Mientras que, en los otros sectores, la temperatura aumenta y desciende abruptamente.

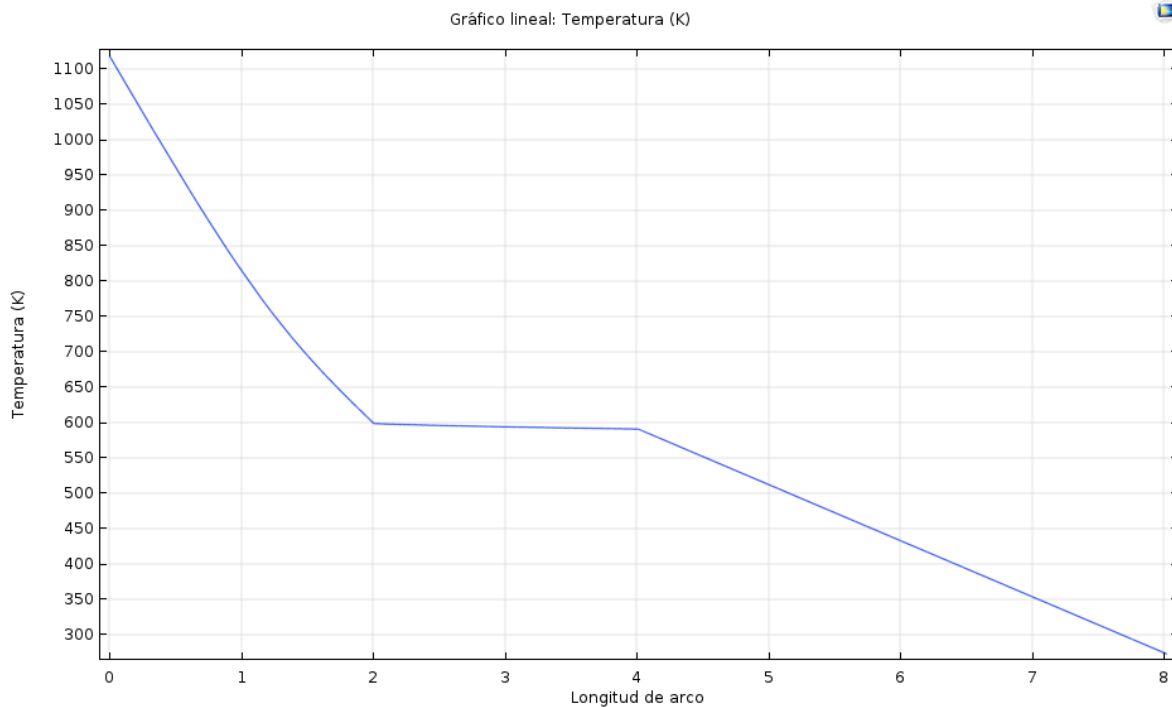


Figura 16: Temperatura v/s longitud de arco (elaboración propia).

En este caso en la figura 16 se puede evidenciar que la temperatura empieza a descender hasta cuando llega a la altura de los 2 m, que es cuando llega al lugar del lecho, en ese momento la temperatura se mantiene a una temperatura casi contante, 600 K aproximadamente. La temperatura que se necesita para que el proceso de tostación se produzca es de 920 K, por lo que se necesita ir aumentando el flujo entrante de calor general.

b) 2000 W/m^2

A este flujo se espera que la temperatura del gas que tenga en contacto con la partícula de molibdenita sea más elevada que en el caso anterior, para así, estimular a que ocurra la reacción de oxidación.

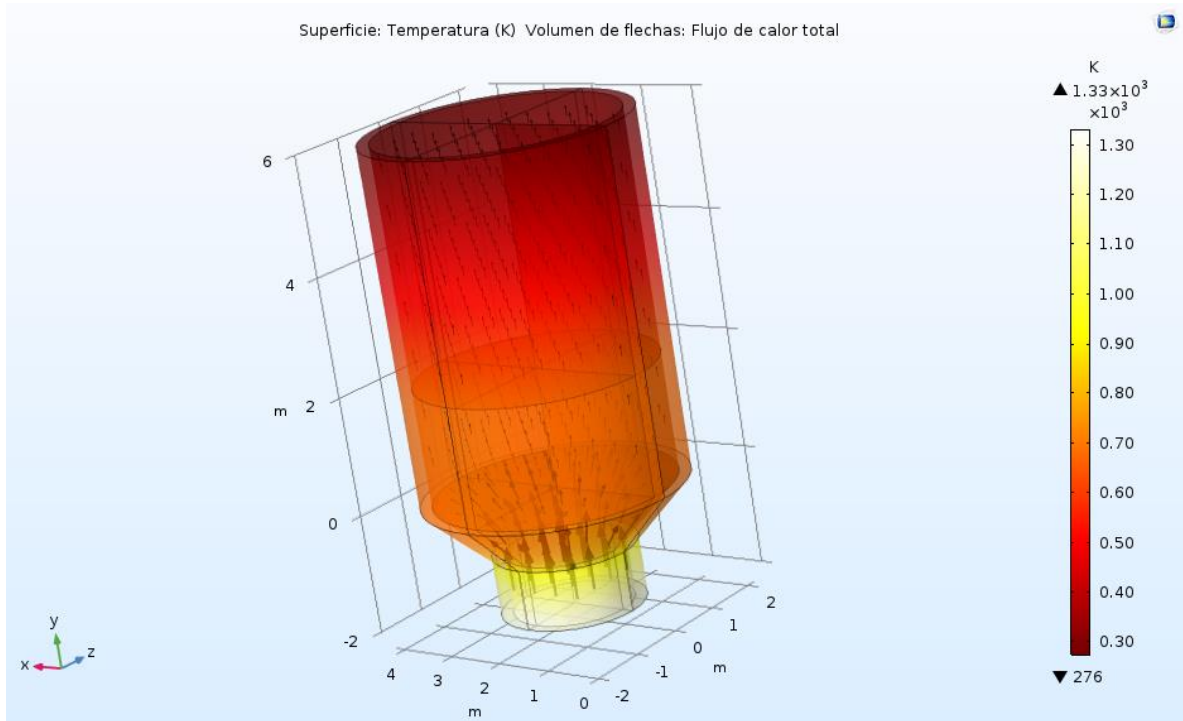


Figura 17: Temperatura (K) y flujo de calor total (elaboración propia).

Como se muestra en la figura 17, el flujo de calor entra por la parte inferior del horno, pasando a través de este y saliendo por la parte superior.

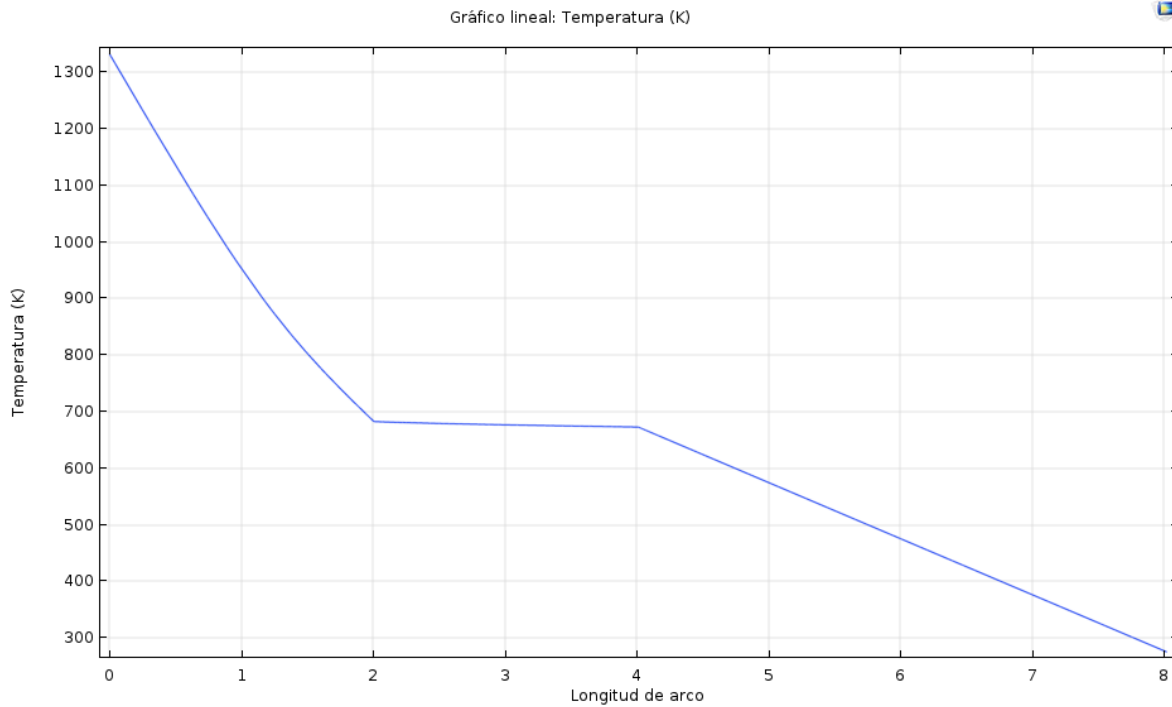


Figura 18: Temperatura v/s longitud de arco (elaboración propia).

En este segundo caso (figura 18), la temperatura empieza a descender a los 1330 K aproximadamente, hasta llegar a los 690 K en donde se mantiene constante durante 2 m de longitud del horno, para luego empezar a descender nuevamente.

c) 2400 W/m^2

Como es posible identificar en la figura 19, en comparación con la ilustración 18, existe un cambio no visible en la barra de colores, pero si en la escala de la temperatura donde va desde los 278 hasta los 1550 K.

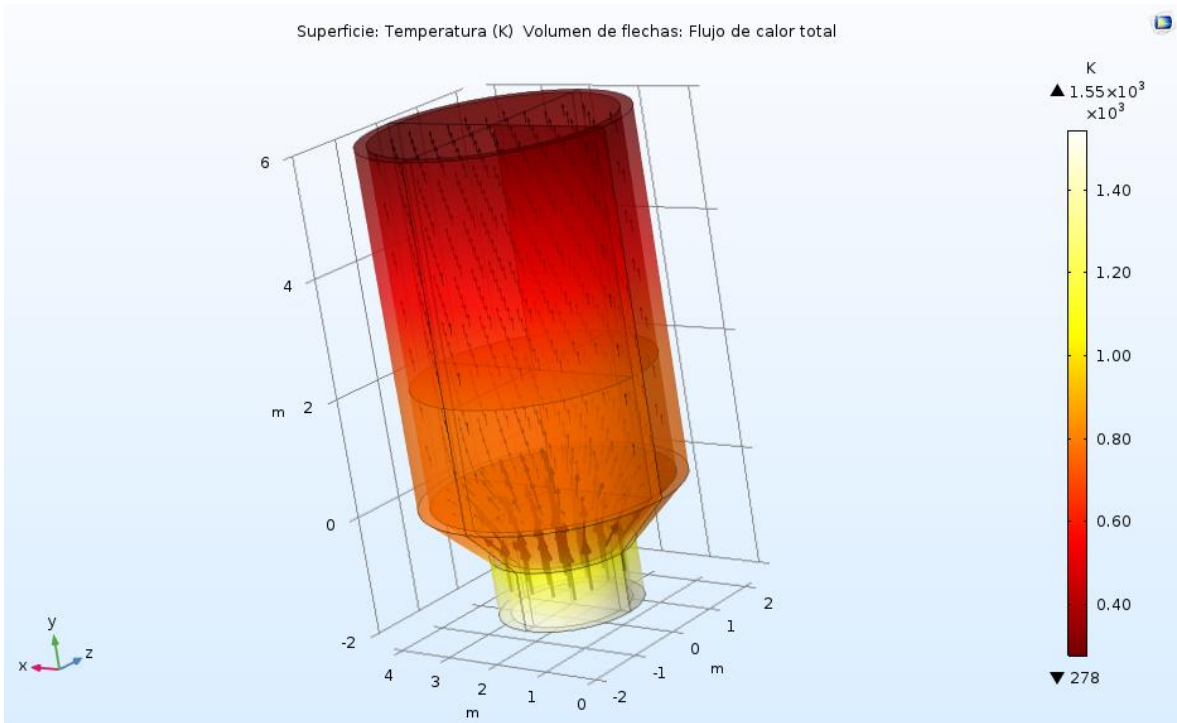


Figura 19: Temperatura (K) y flujo de calor total (elaboración propia).

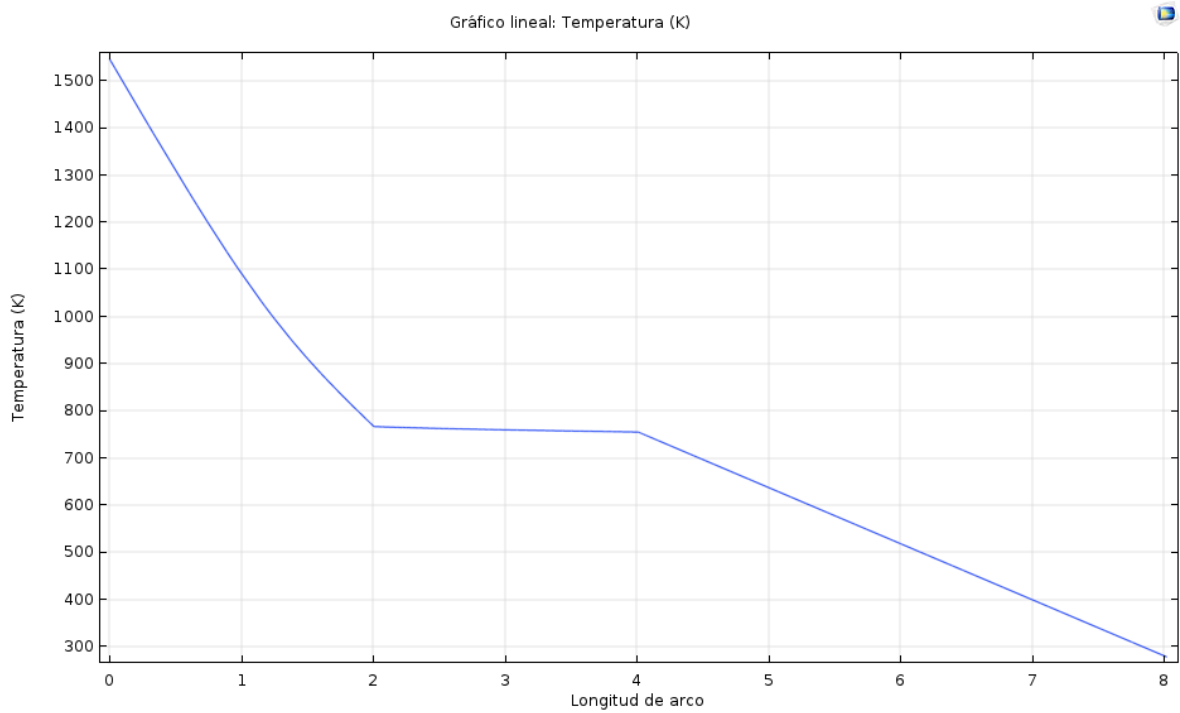


Figura 20: Temperatura v/s longitud de arco (elaboración propia).

Para esta opción se ve (figura 20) un aumento en la temperatura en nuestra zona de interés (2 a 4 m) a los 790 K aproximadamente, pero aún no es suficiente para el proceso de oxidación ocurra.

d) 2800 W/m^2

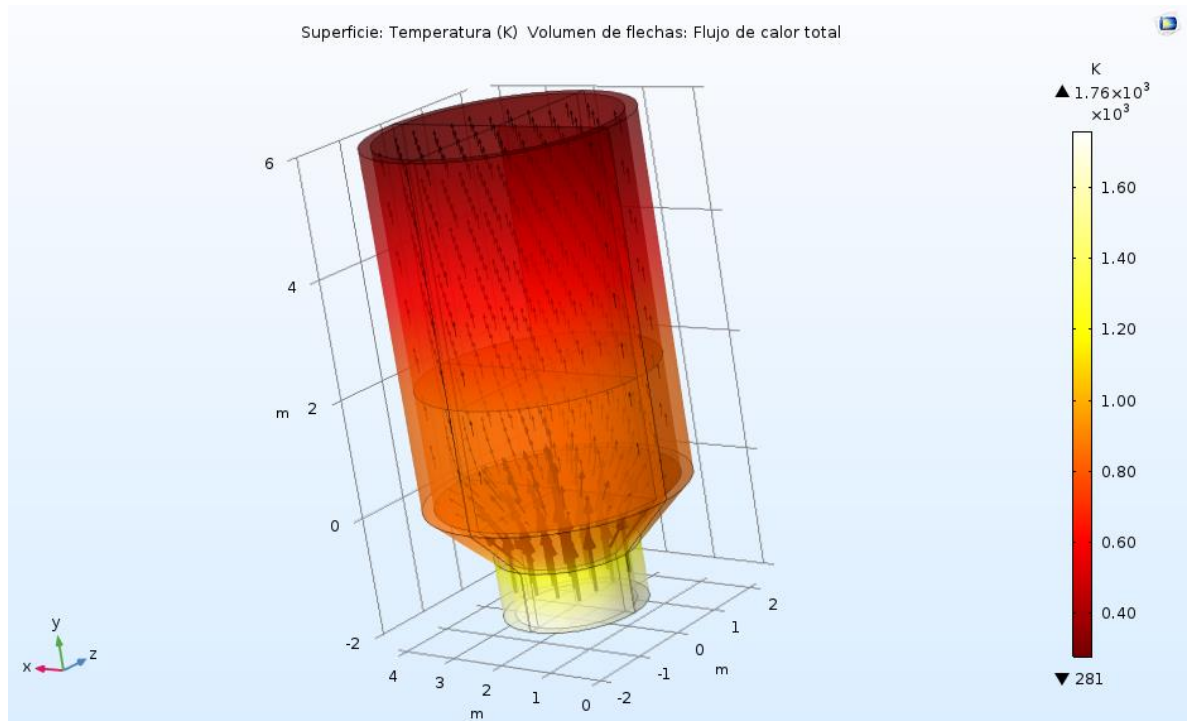


Figura 21: Temperatura (K) y flujo de calor total (elaboración propia).

Nuevamente se ve en la figura 21 un cambio en la escala en la barra de colores, en la cual se puede identificar que del metro 2 al 4 se mantiene el mismo color, por ende, se mantiene la misma temperatura en la zona del lecho.

Además, se puede apreciar que el flujo circulante asciende desde la zona más baja hasta la parte superior del horno sin ningún problema, pasando por la mayor parte del lecho.

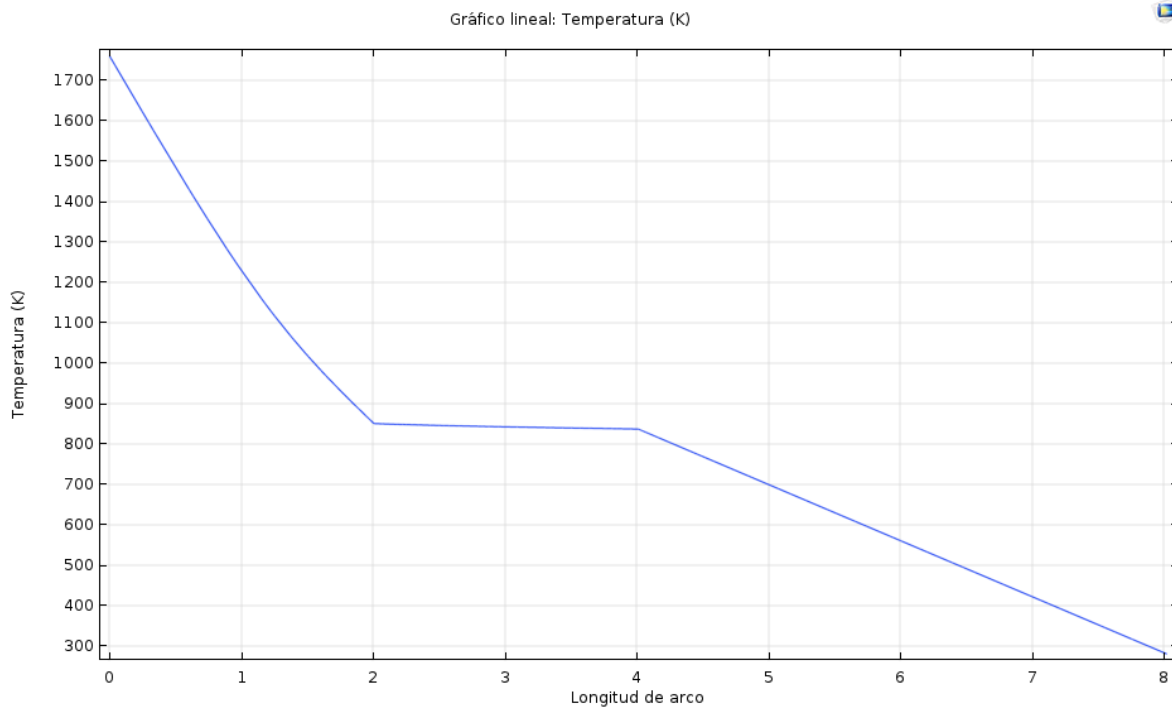


Figura 22: Temperatura v/s longitud de arco (elaboración propia).

La figura 22 hace relación de la temperatura (K) con respecto a la longitud del horno en la coordenada z, la cual representa que temperatura (K) que va teniendo el horno a medida que esta va ascendiendo a través de este. En este caso la temperatura parte a alrededor de los 1800 K y va disminuyendo a medida que avanza para mantenerse una vez que se encuentra con el lecho de molibdenita y situarse a los 850 K para así, mantenerse hasta que el flujo sale del lecho a los 4 m.

e) 3200 W/m^2

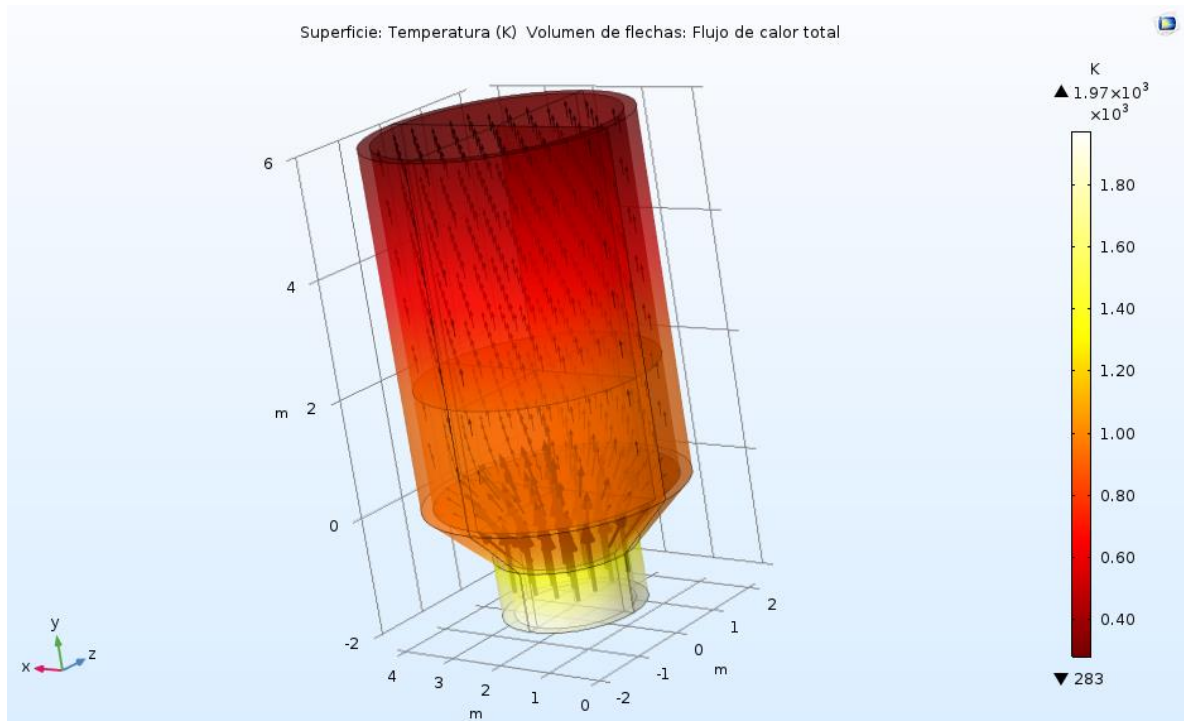


Figura 23: Temperatura (K) y flujo de calor total (elaboración propia).

Como se muestra en la figura 23, se ha obtenido un cambio significativo en el aumento de temperatura a nivel del lecho, además el flujo de aire que ingresa por la parte inferior no representa alguna modificación en dirección cuando este circula a través del lecho, lo que se califica de buena manera en esta modelación.

El siguiente paso es analizar en el grafico lineal las temperaturas exactas que toman las superficies del lecho fluidizado y si estas alcanzan la temperatura necesaria para que el proceso de tostación ocurra y el material se oxide en su mayor cantidad.

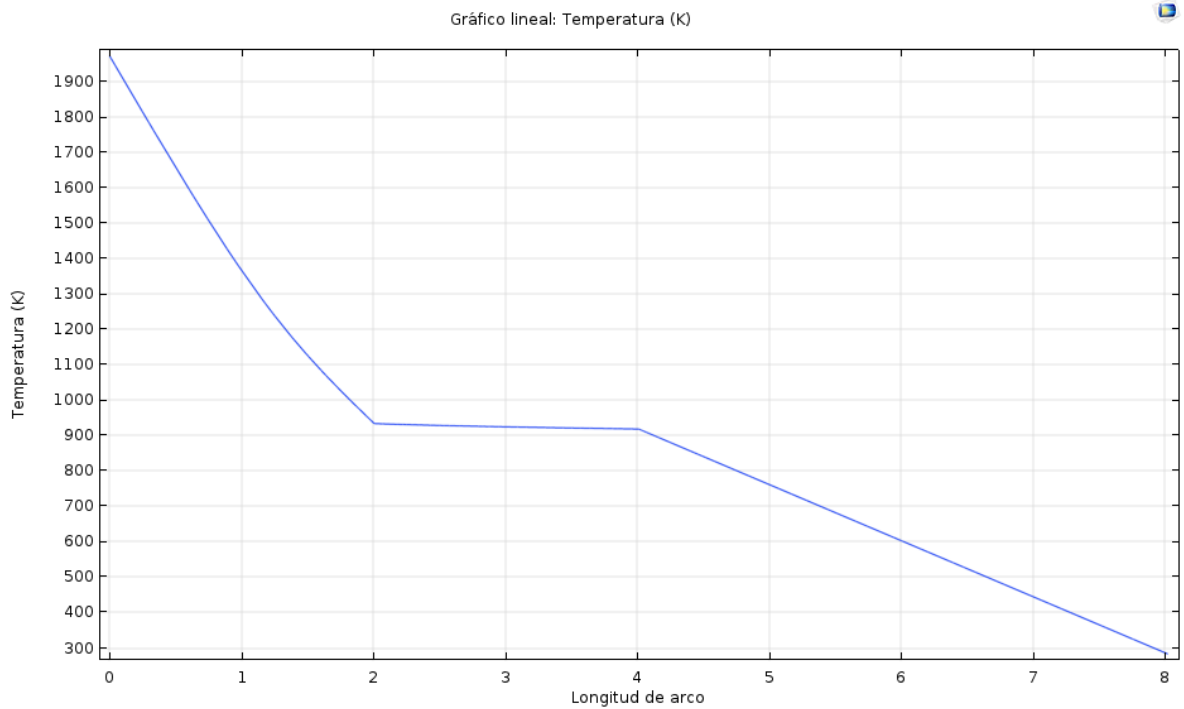


Figura 24: Temperatura v/s longitud de arco (elaboración propia).

Como se menciona anteriormente en la figura 24, para que el material se oxide de manera eficiente, se debe exponer a temperaturas que van de 773 hasta los 923 K. en este caso la temperatura que alcanza el lecho se encuentra en 920 K aproximadamente (figura 24), es decir está dentro del rango de la temperatura y adecuada de tostación de la molibdenita para mantenerse hasta que una vez sale de esta zona de interés.

f) 3600 W/m^2

Se decide aumentar el flujo entrante de calor general para observar si la temperatura en el lecho aún está dentro del rango de interés o si se excede, ya que si se excede no estaría dentro de nuestras opciones.

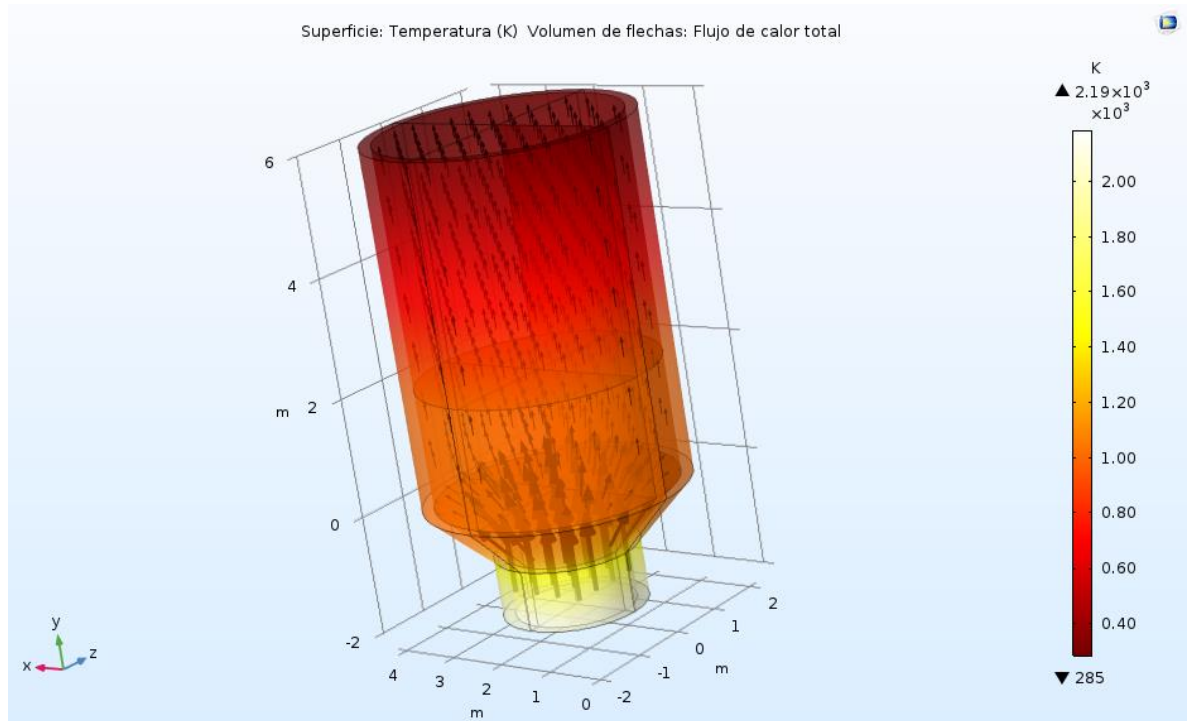


Figura 25: Temperatura (K) y flujo de calor total (elaboración propia).

Como muestra la figura 25 el flujo de aire se mantiene de la forma esperada, no hay variación en dirección y cumple con la finalidad de traspasar el lecho. En cuanto a la temperatura (K), se mantiene de manera uniforme en el lecho.

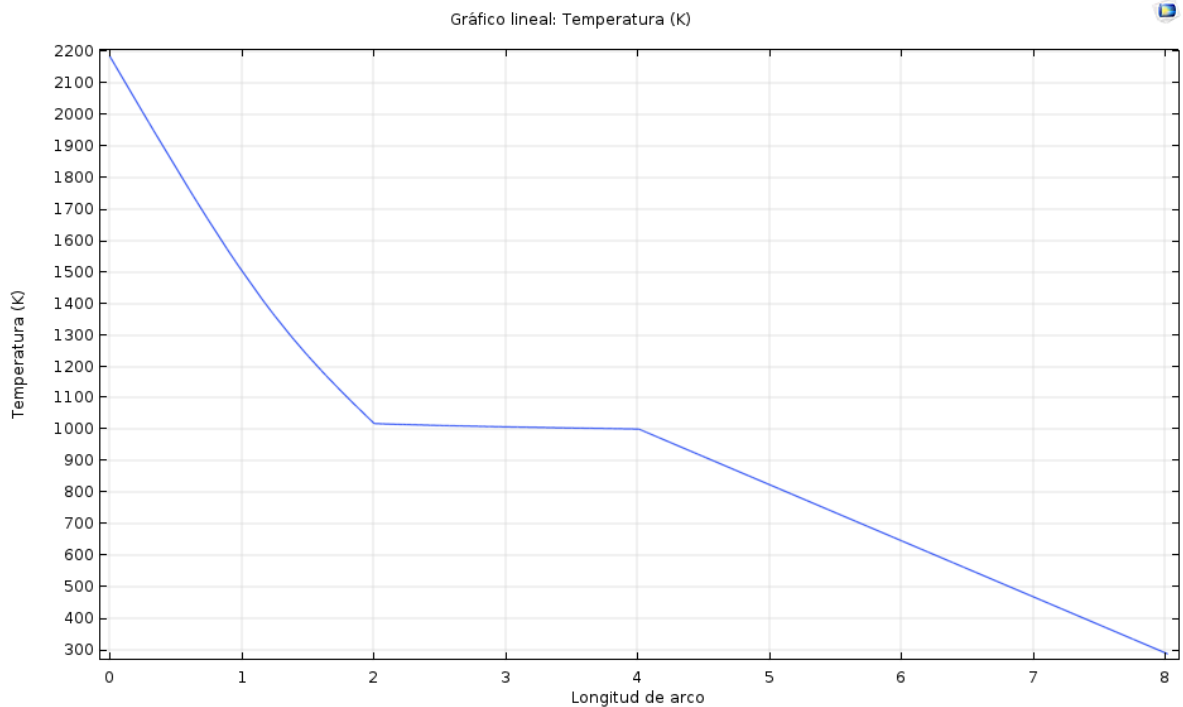


Figura 26: Temperatura v/s longitud de arco (elaboración propia).

Como se puede observar en la figura 26 la temperatura en la superficie a lo largo del horno comienza alrededor de los 2200 K para luego ir descendiendo hasta los 1000 K cuando toma contacto con el lecho, se sigue manteniendo hasta cuando ya no toma contacto con este. Para este caso la temperatura excede el rango ya antes mencionados para que el material se oxide.

Ya obtenido los resultados correspondientes a todos los flujos entrantes de calor general, se puede apreciar que el lecho alcanza las siguientes temperaturas: 690, 790, 850, 920 y 1000 K.

Para obtener una información más completa sobre la estabilidad de las especies participantes a condiciones de temperatura recientemente obtenidas, se confeccionó diagramas de Kellogg en las cuales se involucró las 3 fases sólidas, MoS_2 , MoO_2 y MoO_3 .

4.1.1 T= 690 K

En una primera etapa de modelación la molibdenita alcanzo una temperatura constante de 690 K.

En la figura 27, se muestra un diagrama ternario a 690 K para el sistema Mo-S-O. gracias a este diagrama es posible observar los distintos mecanismos de tostación que puede llevar la molibdenita a una temperatura constante, en las cuales dependerán de las presiones parciales de oxígeno y dióxido de azufre.

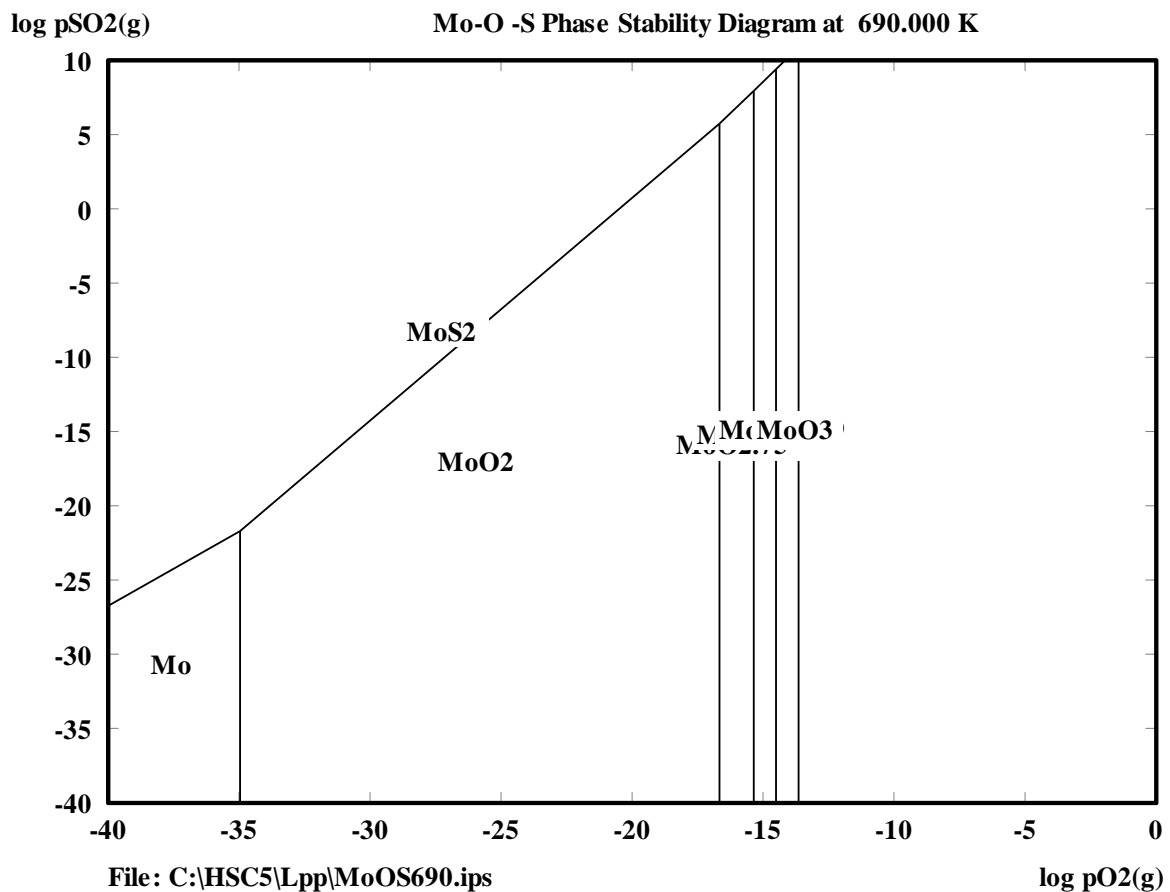


Figura 27: Diagrama de estabilidad Mo-S-O a 690 K (elaboración propia).

4.1.2 T= 790 K

En la figura 28, se muestra el diagrama ternario correspondiente a la temperatura de 790 K. en la cual, se identifica un cambio en las presiones parciales de oxígeno y dióxido de azufre, que son condiciones para tener una tostación de la especie de interés.

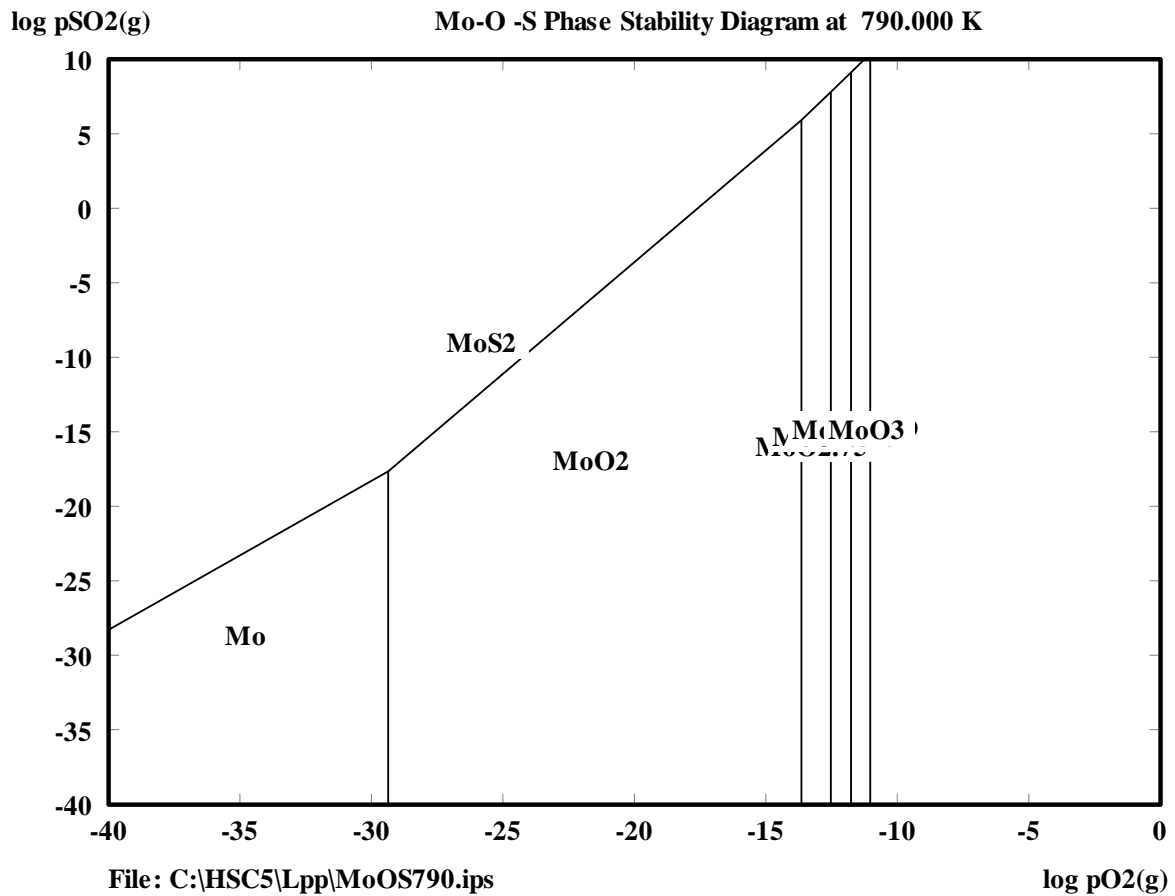


Figura 28: Diagrama de estabilidad Mo-S-O a 790 K (elaboración propia).

4.1.3 T= 850 K

En la figura 29, se muestra el diagrama ternario para el sistema Mo-S-O a una temperatura de 850 K, en la cual también se puede evidenciar una pequeña variación en las presiones parciales de oxígeno y dióxido de azufre. Cada vez se hace más estable que la molibdenita se oxide a MoO_3 , que es lo que se quiere lograr.

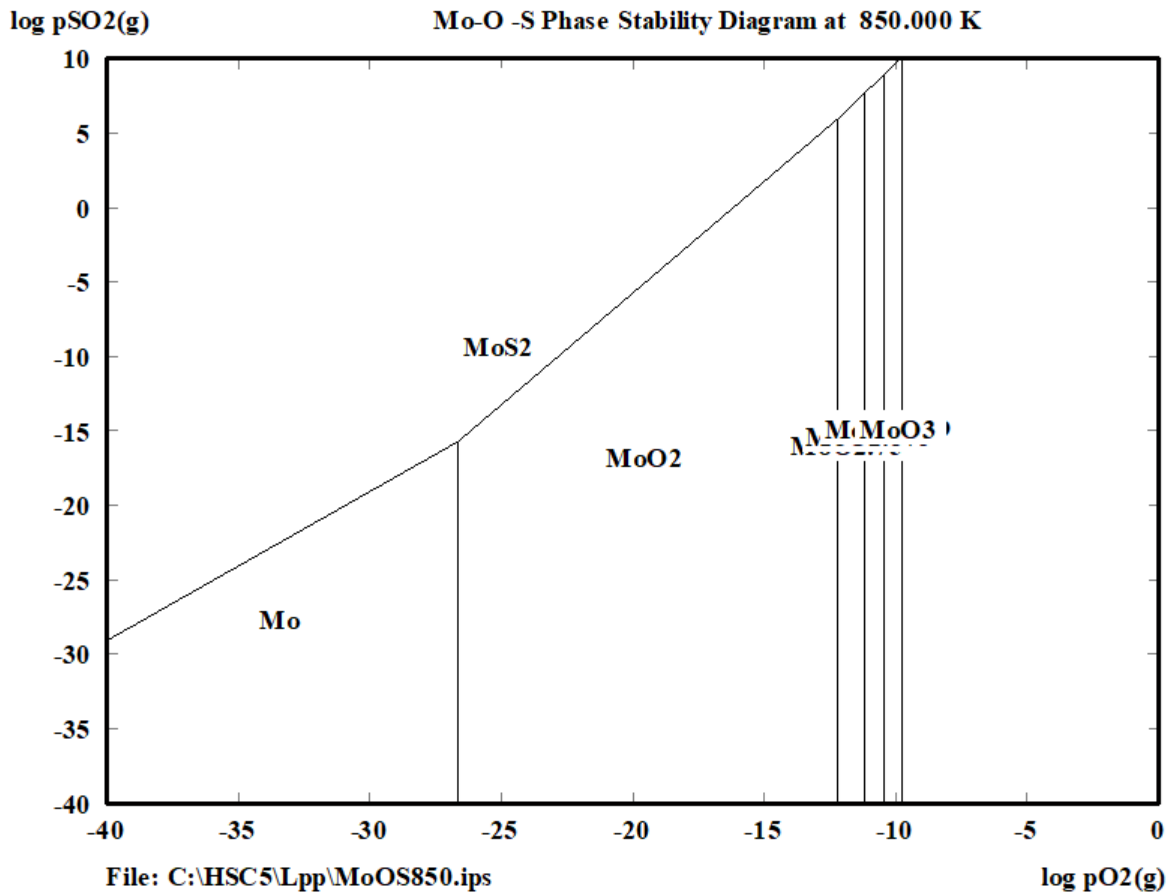


Figura 29: Diagrama de estabilidad Mo-S-O a 850 K (elaboración propia).

4.1.4 T= 920 K

A continuación, se muestra la figura 30, correspondiente a un diagrama ternario, en la cual se analiza la estabilidad de fases para el sistema Mo-S-O a una temperatura de 920 K, cabe destacar que esta temperatura esta en el rango en la cual la molibdenita se tuesta en mayor proporción, como se menciona en este documento. Se puede apreciar que el ambiente es mas oxidante, por la variación de las presiones parciales de oxígeno y dióxido de azufre, ya que se aumenta la temperatura con respecto al caso anterior.

En el caso de la modelación en el software de ecuaciones de derivadas parciales en la figura 24, se evidencia que es posible alcanzar estas temperaturas para que así se pueda realizar el proceso de tostación de la molibdenita.

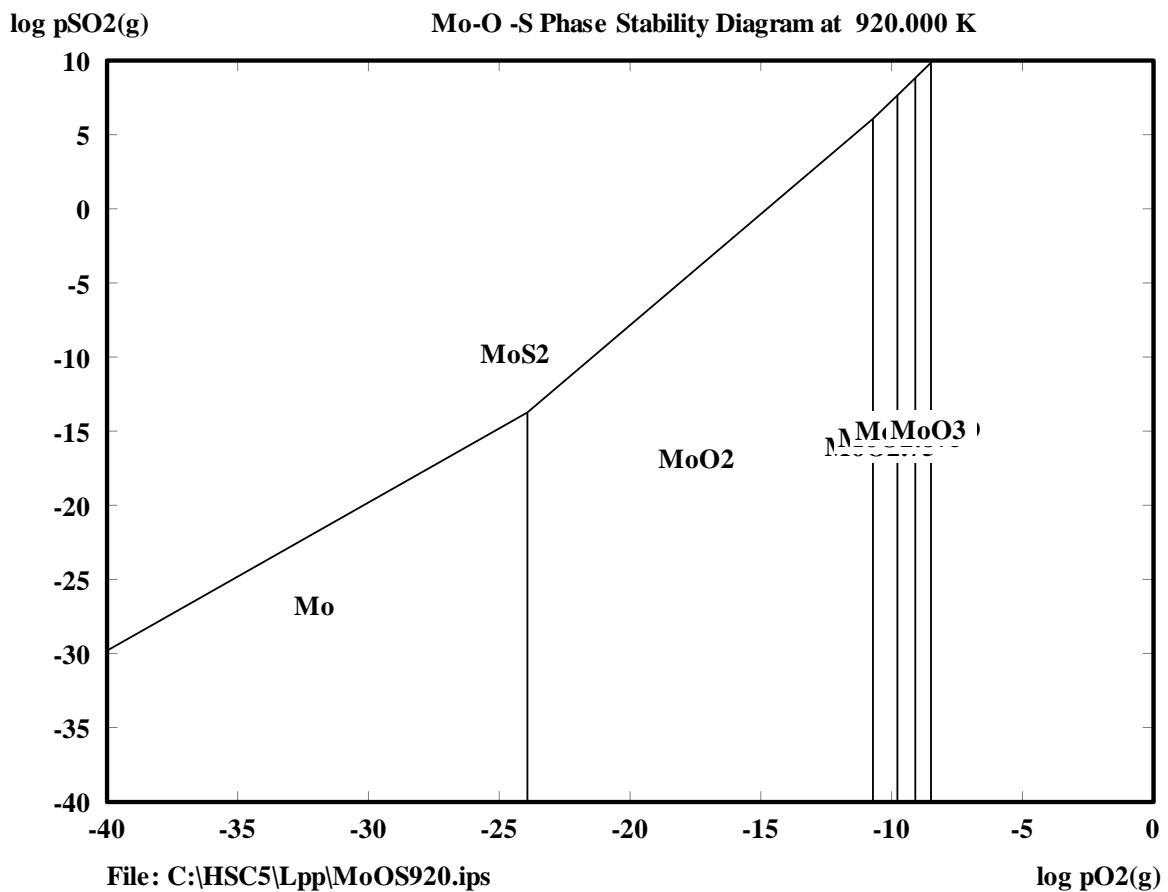


Figura 30: Diagrama de estabilidad Mo-S-O a 920 K (elaboración propia).

4.1.5 T= 1000 K

Se insistió y se elaboró un último diagrama ternario (figura 31) a una temperatura de 1000 K para un sistema de Mo-S-O.

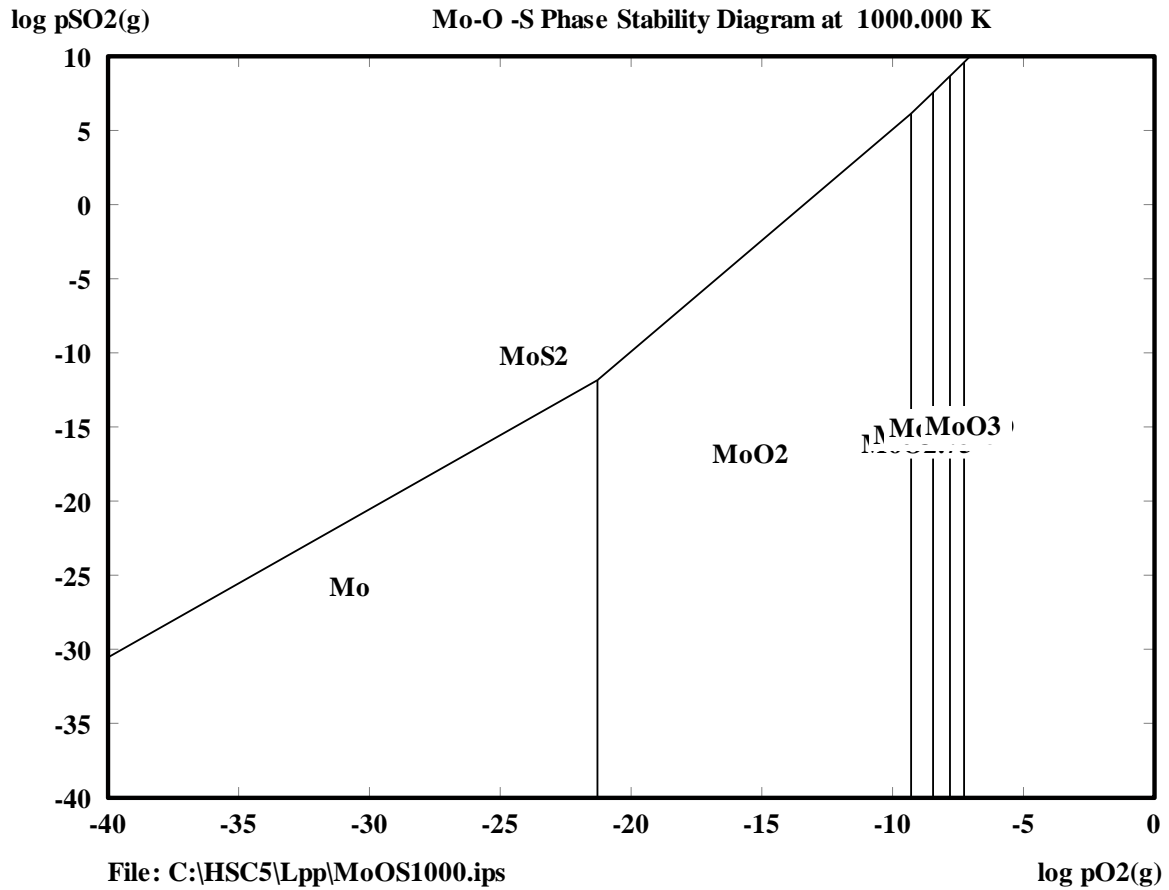


Figura 31: Diagrama de estabilidad Mo-S-O a 1000 K (elaboración propia).

5 CONCLUSIONES

En primer lugar, con la confección de esta memoria se pudo dar a conocer información importante en el área de la tostación de concentrados de molibdenita, ya que, se evidenciaron las desventajas en las que se pueden ir mejorando para optimizar el proceso. Una de las desventajas en la tostación de la molibdenita era la inestabilidad de las temperaturas en los hornos de pisos múltiples, que son los hornos en los que se lleva a cabo la tostación de molibdenita, es por esto que este documento se concentra en un factor clave que influye en la tostación, como lo es la temperatura.

La tostación de la molibdenita ocurre alrededor de los 500 y 650°C, es por esto, que se buscó la manera de encontrar estabilidad de la temperatura en el proceso y así minorizar las pérdidas de material.

La tostación de minerales en hornos es una forma muy rudimentaria de realizar esta operación así que se buscó la manera de incorporar la tostación de molibdenita a hornos de lecho fluidizados, quienes poseen mayor tecnología y control.

Mediante la simulación se pudo dar a conocer resultados que aseguran la estabilidad de la temperatura del lecho fluidizado, esto se logró modificando los flujos entrantes de calor general del horno y estudiando su trayectoria a través de lo largo del horno, lo cual arrojó que con un flujo entrante de calor general de 3200 W/m^2 se puede lograr una estabilidad de temperatura del lecho de alrededor de los 920 K, que está en el rango en el cual ocurre la mayor parte de la oxidación de la molibdenita, oxidando a la MoS_2 a MoO_3 .

Además, se estudió la estabilidad termodinámica de las especies involucradas (Mo-S-O) mediante diagramas de Kellogg, para ver que tan posible es que ocurra la oxidación a trióxido de molibdeno, el cual arrojó que si es posible, ya que, tomando en cuenta las presiones parciales de oxígeno y de dióxido de azufre que están en el ambiente en el que ocurre el proceso cumplen con las condiciones de oxidación, lo que le da más validez a este estudio.

6 RECOMENDACIONES

Una vez realizada esta memoria se puede inferir la posibilidad de estudios posteriores que pueden ayudar a la confección de un horno de lecho fluidizado:

- La confección de accesorios para completar la simulación de manera eficiente.
- Creación en el software de ecuaciones de derivadas parciales la entrada y salida de concentrado al horno (flujo continuo de alimentación de concentrado).
- Estudiar que hacer con los gases contaminantes que expulsa el proceso de tostación (crear una simulación al proceso posterior de tostación).
- Detallar de manera más específica la construcción del horno (estructura).
- Modelar la cinética de tostación de una partícula de molibdenita en un software de ecuaciones de derivadas parciales.

BIBLIOGRAFIA

- Acuña Iver , M. (2012). Recuperación de Mo desde escorias de fundición de Cu. Valparaíso: Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Química.
- Arrebola, A. L. (2019). Mo un elemento bioesencial y de uso industrial. Anales de Química.
- Baena, O. J., Bustamante Rúa, M., & Gaviria Cartagena, A. C. (2008). Pirometalurgia. Medellín, Colombia: Universidad nacional de Colombia, sede Medellín, Facultad de Minas.
- Bazán, V., Brandaleze, E., & Colque, E. (2013). Cinética de Tostación de Concentrados de Baja Ley de Molibdenita. Medellín: Departamento de Ing. Civil de Minas, Universidad Nacional de San Juan.
- COCHILCO. (2017). Mercado Internacional Del Molibdeno. Santiago: Ministerio de Minería.
- Escuela de Ingeniería Mecánica. (2016). Instructivo para la elaboración de memorias en ingeniería mecánica. Curicó: Universidad de Talca.
- Hernández Ibañez , C. A. (2008). Medición de Cinética de Tostación de Concentrados de Molibdenita. Santiago de Chile: Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de Ingeniería de Minas.
- Marin, Utigard, & Hernandez. (2008). Roasting Kinetics of Molybdenite Concentrates. Toronto, Canada : Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum.
- Orellana Jara, F. I. (2018). Modelo Integrado de Simulación y Optimización para Planes Mineros de Mediano Plazo en Minería a Cielo Abierto. Santiago de Chile : Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de Ingeniería de Minas .
- Riveros, G. (2009). PIROMETALURGIA. Santiago: Universidad de Chile, Departamento de Ingeniería de Minas .
- Tamayo Escobar, L. M. (2015). Programa de Doctorado de Ciencia y Tecnología de Materiales. Oviedo: Universidad de Oviedo, Programa de Doctorado de Ciencias y Tecnología de Materiales.

- Valle Núñez, M. (2005). Diseño de un Horno de Lecho Fluidizado. Santiago de Cali: Universidad Autonoma de Occidente Faculta de Ingeniería.
- Vásquez Zamora, P. B. (2015). Optimización de la Recuperación de Molibdenita en el Proceso de Flotación en Laboratorio de Metalurgia de la UTFSM. Viña del Mar: Universidad Técnica Federico Santa María.
- Vazquez, & Pedraza. (1982). Diseño y Construcción de un Horno de Lecho en Surtidor a Escala de Laboratorio y su Aplicación. revista latinoamericana de metalurgia y materiales, 61-70.