

## 1. Datos Generales de la asignatura

<b>Nombre de la asignatura:</b>	Pirometalurgia
<b>Clave de la asignatura:</b>	MEF – 1603
<b>SATCA<sup>1</sup>:</b>	3-2-5
<b>Carrera:</b>	Ingeniería Química

## 2. Presentación

### Caracterización de la asignatura

Este curso es de gran importancia puesto que le facilita al estudiante la aplicación de sus conocimientos previos para el estudio de los procesos pirometalúrgicos desde tres perspectivas: a) análisis termodinámico que permite anticipar hacia dónde se dirigen los procesos pirometalúrgicos, b) la cinética y los fenómenos de transporte c) los balances macroscópicos de materia y energía para cuantificar los procesos metalúrgicos industriales.

La formación adquirida permitirá al egresado entender y controlar estos procesos, partiendo de la capacidad de evaluar las variables que intervienen en cada caso particular.

Se efectuará un análisis de los procesos pirometalúrgicos establecidos y su orientación futura cubriéndose aspectos de: secado, tostación de concentrados, fusión a mata, conversión de matas, refinación a fuego de cobre, limpieza de escorias y tratamiento de gases. El análisis involucra tanto los aspectos teóricos como los conceptuales de la tecnología empleada.

Al finalizar el alumno :

- ✓ Reconocerá los procesos pirometalúrgicos de acuerdo con sus características y principios que los rigen.
- ✓ Aplicará los principios termodinámicos y cinéticos a la resolución de problemas típicos de pirometalurgia.

<sup>1</sup> Sistema de Asignación y Transferencia de Créditos Académicos

- ✓ Analizará los procesos pirometalúrgicos industriales, enfatizando aquellos que son más comunes en nuestro entorno.
- ✓ Reconocerá los parámetros que controlan a cada proceso particular.

### Intención didáctica

Este curso tiene como objetivo el lograr que el alumno comprenda los fundamentos fisicoquímicos así como los aspectos operativos de los procesos pirometalúrgicos con el fin de analizar su aplicabilidad a casos particulares. Con este cimienta se desarrolla la materia en cinco unidades principales.

Como introducción y fundamento de la materia, en la primera unidad se reconocerán los procesos pirometalúrgicos de acuerdo con sus características esenciales y se retomarán los principios termodinámicos y cinéticos indispensables en estos procesos.

En la segunda unidad se describirán los tipos de tratamientos usados para preparar el material a concentrar para su subsecuente proceso de recuperación en procesos pirometalúrgicos.

Para la recuperación de metales desde el concentrado, se determinará en la tercera unidad el propósito y la descripción de las operaciones de fusión y conversión aplicadas a concentrados de sulfuros.

La cuarta unidad tiene la intención de ilustrar los principios fundamentales de los procesos de reducción que buscan la liberación del metal por medio de un agente reductor y su aplicabilidad en procesos industriales.

En la última unidad se visualizará que los procesos de refinación pirometalúrgicos son comercialmente utilizados para la purificación de productos de los procesos de fusión/conversión y de fusión/reducción.

Al finalizar todos estos apartados, se le guiará al estudiante para la conformación de un proyecto integrador en el área de los procesos pirometalúrgicos, que permitirá la aplicación integral de los conocimientos adquiridos hasta el momento y analizar su paralelo en la industria actual.

El docente actúa como guía, facilitador y asesor orientando al alumno en las actividades de aprendizaje y en la realización de proyectos, crea las condiciones para la construcción del conocimiento promoviendo el desarrollo de capacidades, habilidades y actitudes.

### 3. Participantes en el diseño y seguimiento curricular del programa

Lugar y fecha de elaboración o revisión	Participantes	Observaciones
Tecnológico Nacional de México. Instituto Tecnológico de la Laguna.  Abril de 2016.	Ing. Ana María Flores Romero.  Ing. Francisco de Jesús González Peña.  Ing. Delia Cárdenas Rodríguez.  Ing. Kenia Crispín García.  Ing. Adriana Gamboa Hernández.  Ing. Karla V. Guevara Amatón.  Ing. Simón A. Pedroza Figueroa  Ing. Susana M. García Delgado	Revisión de los programas de las materias de la especialidad:  Metalurgia

### 4. Competencia(s) a desarrollar

Competencia(s) específica(s) de la asignatura
<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Identifica el proceso inmediato que siguen los concentrados de minerales cuyo metal no pasa por una reducción electrolítica.</li> <li>✓ Reconoce a los procesos pirometalúrgicos de acuerdo con sus características fundamentales.</li> <li>✓ Concretiza los procesos termodinámicos y cinéticos indispensables en los procesos pirometalúrgicos.</li> <li>✓ Establece el propósito y describir las operaciones de fusión y conversión aplicadas a concentrados de sulfuros.</li> <li>✓ Ilustra los principios fundamentales de los procesos de reducción y su aplicabilidad en procesos industriales.</li> </ul>

### 5. Competencias previas

<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Identifica y representa esquemáticamente cada una de las operaciones y proceso unitarios comunes en el campo de la ingeniería realizando los balances</li> </ul>
---

macroscópicos de materia y energía con y sin reacción asociados a procesos metalúrgicos.

- ✓ Aplica los conocimientos en termodinámica y fisicoquímica aplicados según su estado, composición y temperatura de los minerales.
- ✓ Conoce el origen y los procesos de purificación y preparación de los minerales utilizados industrialmente.
- ✓ Conoce los fundamentos y técnicas físicas, así como las aplicaciones fisicoquímicas para la concentración de los minerales utilizando diferentes procesos según su objetivo final.

## 6. Temario

No.	Temas	Subtemas
1.	<b>FUNDAMENTOS TERMODINÁMICOS Y CINÉTICOS DE LOS PROCESOS PIROMETALÚRGICOS</b>	<b>1.1</b> Generalidades sobre los procesos pirometalúrgicos <b>1.2</b> Clasificación de los procesos pirometalúrgicos <b>1.3</b> Herramientas de la pirometalurgia: termodinámica, cinética y fenómenos de transporte <b>1.3.1</b> Bases termodinámicas <b>1.3.2</b> Cinética de las reacciones sólido – gas <b>1.3.3</b> Construcción e interpretación del diagrama de Kellog <b>1.3.4</b> Construcción e interpretación de diagramas de Ellingham <b>1.4</b> Técnicas de instrumentación para caracterización.
2.	<b>PRETRATAMIENTO DE CONCENTRADOS</b>	<b>2.1</b> Secado y Calcinación <b>2.2</b> Tostación <b>2.2.1</b> Termodinámica aplicable en tostación <b>2.2.2</b> Cinética de las reacciones gas – sólido <b>2.3</b> Procesos de Aglomeración <b>2.3.1</b> Sinterización <b>2.3.2</b> Peletización <b>2.3.3</b> Briquetización <b>2.3.4</b> Nodulización
3.	<b>PROCESOS DE FUSIÓN Y CONVERSIÓN</b>	<b>3.1</b> Fusión <b>3.1.1</b> Formación de mata y escoria

		<b>3.1.1.1</b> Bases termodinámicas <b>3.1.1.2</b> Fundamentos de las escorias <b>3.1.2</b> Procesos de fusión <b>3.1.2.1</b> Hornos de reverbero <b>3.1.2.2</b> Hornos de fusión instantánea <b>3.1.2.3</b> Hornos eléctricos <b>3.2</b> Conversión <b>3.2.1</b> Fundamentos de conversión <b>3.3</b> Fusión y conversión continua de cobre
<b>4.</b>	<b>PROCESOS DE REDUCCIÓN</b>	<b>4.1</b> Termodinámica de Óxido-Reducción <b>4.1.1</b> Presión de equilibrio del Oxígeno <b>4.1.2</b> Diagrama: Energía libre – Temperatura <b>4.2</b> Altos Hornos <b>4.2.1</b> Generalidades <b>4.2.2</b> Altos hornos de hierro, plomo y plomo – zinc <b>4.3</b> Reducción electrotérmica
<b>5</b>	<b>PROCESOS DE REFINACIÓN PARA SOLUCIONES METÁLICAS</b>	<b>5.1</b> Procesos metal – escoria <b>5.1.1</b> Oxidación de impurezas <b>5.1.1.1</b> Reacciones de formación <b>5.1.1.2</b> Purificación de metales no ferrosos <b>5.1.2</b> Reacciones desoxidación <b>5.2</b> Procesos metal – metal y metal – compuesto <b>5.2.1</b> Descenso de solubilidad <b>5.2.2</b> Inmiscibilidad <b>5.2.3</b> Adición de reactivo <b>5.2.4</b> Volatilización selectiva <b>5.3</b> Procesos metal – gas y metal – vapor. <b>5.3.1</b> Refinación al vacío <b>5.3.2</b> Lavado con gas inerte <b>5.3.3</b> Evolución haluros <b>5.3.4</b> Carbonilos <b>5.4</b> Tratamiento de gases residuales

## 7. Actividades de aprendizaje de los temas

<b>Tema 1. Fundamentos Termodinámicos y Cinéticos de los Procesos Pirometalúrgicos.</b>	
<b>Competencias</b>	<b>Actividades de aprendizaje</b>
<p><b>Específica(s):</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Valora el proceso inmediato que siguen los concentrados de minerales cuyo metal no pasa por una reducción electrolítica.</li> <li>✓ Reconoce los procesos pirometalúrgicos de acuerdo con sus características fundamentales.</li> <li>✓ Concretiza los procesos termodinámicos y cinéticos indispensables en los procesos pirometalúrgicos.</li> <li>✓ Enlista y describe los tipos de tratamientos usados para preparar el material concentrado para su subsecuente proceso de recuperación en pirometalurgia.</li> </ul> <p><b>Genéricas:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Capacidad de análisis y síntesis.</li> <li>✓ Habilidades en el uso de tecnologías de la información.</li> <li>✓ Capacidad de comunicación oral y escrita.</li> <li>✓ Solución de problemas.</li> <li>✓ Trabajo en equipo.</li> <li>✓ Capacidad de aplicar el conocimiento en práctica.</li> <li>✓ Capacidad de aprender.</li> <li>✓ Habilidad de trabajo autónomo.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Establecer generalidades, aplicaciones y ejemplos de los procesos pirometalúrgicos en forma general en un cuadro sinóptico.</li> <li>✓ Realizar en un cuadro comparativo la clasificación de los procesos, visualizando aplicaciones, ventajas y desventajas de los mismos.</li> <li>✓ Realizar ejercicios en los que se involucren los procesos termodinámicos esenciales a aplicar en procesos pirometalúrgicos.</li> <li>✓ Elaborar e interpretar diagramas de fases y análisis termodinámico en la búsqueda de información significativa para la predicción del comportamiento según la temperatura y composición dada.</li> <li>✓ Reflexionar en el uso de la cinética de las reacciones y aplicarla como información adicional a las bases termodinámicas para el análisis en el comportamiento de los procesos pirometalúrgicos.</li> </ul>

Tema 2. Pretratamiento de Concentrados.	
Competencias	Actividades de aprendizaje
<p>Específica(s):</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Enlista y describe los tipos de tratamientos usados para preparar el material concentrado para su subsecuente proceso de recuperación en pirometalurgia.</li> </ul> <p>Genéricas:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Capacidad de análisis y síntesis.</li> <li>✓ Habilidades en el uso de tecnologías de la información.</li> <li>✓ Capacidad de comunicación oral y escrita.</li> <li>✓ Solución de problemas.</li> <li>✓ Trabajo en equipo.</li> <li>✓ Capacidad de aplicar el conocimiento en práctica.</li> <li>✓ Capacidad de aprender.</li> <li>✓ Habilidad de trabajo autónomo.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Realizar una investigación para establecer los objetivos y las aplicaciones de secado y calcinación por medio de mapas conceptuales.</li> <li>✓ Enlistar los tipos de equipos utilizados en secado y calcinación elaborando una tabla comparativa sobre su uso, ventajas, desventajas y ejemplos en los procesos industriales.</li> <li>✓ Asentar el propósito y las aplicaciones industriales sobre equipos de tostación, así como las condiciones indispensables para su óptimo funcionamiento.</li> <li>✓ Realizar ejercicios en base termodinámica y analizando su cinética aplicados en tostación.</li> <li>✓ Analizar ejemplos aplicados en la tostación de sulfatos, oxidativa y magnética.</li> <li>✓ Investigar el propósito y las aplicaciones sobre los procesos de aglomeración generando expectativas sobre su utilización.</li> <li>✓ Establecer las diferencias y similitudes entre los distintos tipos de aglomeración aplicados al óxido de hierro.</li> <li>✓ Integrar el procedimiento para la aplicación de sinterización, considerando equipos, condiciones de entrada, requerimiento en salida de concentrados y control de gases.</li> </ul>

Tema 3. Procesos de Fusión y Conversión	
Competencias	Actividades de aprendizaje
<p>Específica(s):</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Establece el propósito y describe las operaciones de fusión y conversión aplicadas a concentrados de sulfuros.</li> </ul> <p>Genéricas:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Capacidad de análisis y síntesis.</li> <li>✓ Habilidades en el uso de tecnologías de la información.</li> <li>✓ Capacidad de comunicación oral y escrita.</li> <li>✓ Solución de problemas.</li> <li>✓ Trabajo en equipo.</li> <li>✓ Capacidad de aplicar el conocimiento en práctica.</li> <li>✓ Capacidad de aprender.</li> <li>✓ Habilidad de trabajo autónomo.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Establecer el objetivo del proceso de fusión, así como realizar un cuadro sinóptico para describir su utilidad en la industria metalúrgica y visualizando ejemplos característicos de este proceso.</li> <li>✓ Realizar la descripción termodinámica del proceso de fusión, determinando las condiciones de salida de los compuestos involucrados.</li> <li>✓ Enlistar los parámetros en la generación de escoria, así como sus propiedades, composiciones y su posterior tratamiento como residuo.</li> <li>✓ Realizar una investigación bibliográfica y exponer los tipos de hornos en función de sus características.</li> <li>✓ Realizar los balances de materia y energía, generando sus resultados por medio de una simulación en un software matemático.</li> <li>✓ Establecer las bases termodinámicas y el propósito de la operación de conversión, así como la resolución de casos aplicados como el cobre.</li> <li>✓ Investigar sobre algunas actualizaciones generadas en el proceso de conversión del cobre y describirlas por medio de un diagrama de flujo del proceso comercial, mientras que se desarrollan a la par sus ventajas y desventajas.</li> <li>✓ Realizar una tabla comparativa de</li> </ul>



	algunos procesos que generan mayor consumo de energía y fundamentar cual proceso es más eficiente en este aspecto.
<b>Tema 4. Procesos de Reducción</b>	
Competencias	Actividades de aprendizaje
<p><b>Específica(s):</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Ilustra los principios fundamentales de los procesos de reducción y su aplicabilidad en procesos industriales.</li> </ul> <p><b>Genéricas:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Capacidad de análisis y síntesis.</li> <li>✓ Habilidades en el uso de tecnologías de la información.</li> <li>✓ Capacidad de comunicación oral y escrita.</li> <li>✓ Solución de problemas.</li> <li>✓ Trabajo en equipo.</li> <li>✓ Capacidad de aplicar el conocimiento en práctica.</li> <li>✓ Capacidad de aprender.</li> <li>✓ Habilidad de trabajo autónomo.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Organizar un mapa mental sobre requerimientos para la reducción en pirometalurgia a fin de generar la liberación del metal deseado, cuidando la estabilidad del compuesto.</li> <li>✓ Realizar ejercicios utilizando las bases termodinámicas aplicadas en los diagramas de G vs T, para concretar la factibilidad de los procesos de reducción y calcular su eficiencia.</li> <li>✓ Comparar los tipos de altos hornos, clasificándolos por medio de importancia, ventajas, desventajas, aplicaciones en la industria y ejemplos designados en esta área.</li> </ul>
<b>Tema 5. Procesos de Refinación para Soluciones Metálicas</b>	
Competencias	Actividades de aprendizaje
<p><b>Específica(s):</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Visualiza que los procesos de refinación pirometalúrgicos son comercialmente utilizados para la purificación de productos de los procesos de fusión/conversión y de fusión/reducción.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Crear un mapa conceptual donde se especifique los propósitos de la refinación sólo para los procesos pirometalúrgicos, así como sus ventajas comerciales por la que se desarrolla estos procesos.</li> <li>✓ Plasmar la definición de escorias, la forma en que son generadas, su función y los parámetros más importantes para su control.</li> </ul>

<p><b>Genéricas:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Capacidad de análisis y síntesis.</li> <li>✓ Habilidades en el uso de tecnologías de la información.</li> <li>✓ Capacidad de comunicación oral y escrita.</li> <li>✓ Solución de problemas.</li> <li>✓ Trabajo en equipo.</li> <li>✓ Capacidad de aplicar el conocimiento en práctica.</li> <li>✓ Capacidad de aprender.</li> <li>✓ Habilidad de trabajo autónomo.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Establecer las bases para la purificación de soluciones utilizando reacciones de oxidación, tratando tanto soluciones de hierro líquido como metálicas no ferrosas.</li> <li>✓ Describir los procesos de refinación basados en técnicas de separación de fases para la predicción de la factibilidad de su purificación y por medio del estudio de los diagramas de fases entre el solvente y el elemento impuro.</li> <li>✓ Elaborar un estudio sobre el proceso de purificación de los haluros por medio de la purificación del metal o según el beneficio del mineral.</li> <li>✓ Generar un diagrama para la descripción de un proceso carbonilo por la purificación del níquel.</li> </ul>
---	--

## 8. Práctica(s)

- Calcinación de sulfuros y carbonatos.
- Tostación de concentrado de sulfuros.
- Fusión de concentrado de plomo

## 9. Proyecto de asignatura

El proyecto consiste en la elaboración de un proceso que comprenda desde la concentración de minerales, hasta la refinación de un metal, y donde se desarrolle cada etapa requerida para aplicarlo en su procesamiento pirometalúrgico.

- ✓ Fundamentación. El alumno realiza una búsqueda bibliográfica del proceso de producción de Plomo y Zinc por vía pirometalúrgica. En caso de ser posible se visita alguna planta en la cual se realice un proceso de este tipo.
- ✓ Planeación. Se le proporciona un mineral con el análisis metalúrgico para que ellos determinen el proceso mediante el cual debe ser tratado de acuerdo a las

características físicas y químicas. El alumno realiza el diagrama de flujo del proceso, enlista los materiales y equipos requeridos para el tratamiento.

- ✓ Ejecución. De acuerdo a las opciones entregadas por los alumnos, al material y equipo disponible en el laboratorio, se llevan a cabo de manera práctica a nivel laboratorio, las diferentes etapas para obtener un metal de alta pureza. Se analiza la composición del metal obtenido, se realiza el análisis termodinámico y cinético del proceso y una comparativa entre los resultados teóricos y prácticos.
- ✓ Evaluación. El alumno realiza un informe del proyecto en el cual incluya: procedimiento, cálculos, incorporación de aspectos ambientales (tratamiento de los residuos y gases producidos) y eficiencia del proceso, de acuerdo al contenido y análisis realizado se le asigna una calificación y se le hacen observaciones para su mejora.

## 10. Evaluación por competencias

Realizar la evaluación diagnóstica, formativa y sumativa.

- ✓ Participación en el desarrollo del curso y en la resolución de problemas.
- ✓ Informes de prácticas, tareas y visitas industriales.
- ✓ Exámenes escritos.
- ✓ Exposiciones
- ✓ Caso integrador
- ✓ Portafolio de evidencias (formato electrónico). Toda evidencia debe de estar contenida dentro del portafolio de evidencias.

Los instrumentos mediante los cuales se evaluarán las competencias adquiridas serán:

- ✓ Rúbricas.
- ✓ Cuestionarios.
- ✓ Listas de cotejo.

## 11. Fuentes de información

Autores varios. *Unit Process in Extractive Metallurgy - Pirometalurgia*. Curso tutorial de Montana College of Mineral Science and Technology.

Restrepo, O.J.; Bustamante, M.O; Gaviria, A.C. *Notas de clase de la asignatura de Pirometalurgia*. Instituto de Minerales CIMEX, Facultad de Minas. Colombia.

Sohn, H.Y.; Wadsworth, M.E.(1986) *Cinética de los procesos de la Metalurgia Extractiva*. Editorial Trillas. México.