



## 1. Datos Generales de la asignatura

<b>Nombre de la asignatura:</b> <b>Clave de la asignatura:</b> <b>SATCA<sup>1</sup>:</b> <b>Carrera:</b>	<b>Pirometalurgia</b> <b>MEF-2404</b> <b>3-2-5</b> <b>Ingeniería Química</b>
---	---

## 2. Presentación

<b>Caracterización de la asignatura</b>
<p>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.</p> <p>Se efectúa 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.</p> <p>Al finalizar el alumno:</p> <ul style="list-style-type: none"><li>- Reconoce los procesos pirometalúrgicos de acuerdo con sus características y principios que los rigen.</li><li>- Aplica los principios termodinámicos y cinéticos a la resolución de problemas típicos de pirometalurgia.</li><li>- Analiza los procesos pirometalúrgicos industriales, enfatizando aquellos que son más comunes en nuestro entorno.</li><li>- Reconoce los parámetros que controlan a cada proceso..</li></ul>
<b>Intención didáctica</b>
<p>Este curso tiene como objetivo lograr que el estudiante 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 cimiento se desarrolla la materia en cinco temas principales.</p> <p>Como introducción y fundamento de la materia, en el primer tema se reconocen los procesos pirometalúrgicos de acuerdo con sus características esenciales y se retoman los principios termodinámicos y cinéticos</p>

indispensables en estos procesos.

En el tema 2, se describen 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 determina en el tema 3 el propósito y la descripción de las operaciones de fusión y conversión aplicadas a concentrados de sulfuros.

El tema 4 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 el último tema se 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.

Al finalizar todos estos temas, se le guía 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.

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

Lugar y fecha de elaboración o revisión	Participantes	Observaciones
Instituto Tecnológico de La Laguna, marzo 2024	Integrantes de la Academia de Ingeniería Química del ITL.	Diseño del módulo de especialidad de la carrera de Ingeniería Química.

### 4. Competencia(s) a desarrollar

Competencia(s) específica(s) de la asignatura
Conoce los fundamentos del tratamiento de minerales y concentrados a altas temperaturas, selección de equipo y materiales del proceso, así como el análisis fisicoquímico de las reacciones y sus aplicaciones para la obtención de diferentes metales básicos.

### 5. Competencias previas

Realiza balances macroscópicos de materia y energía con y sin reacción

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

asociados a procesos metalúrgicos.

Aplica los conocimientos en termodinámica y fisicoquímica aplicados según su estado, composición y temperatura de los minerales.

## 6. Temario

No.	Temas	Subtemas
1	<b>FUNDAMENTOS TERMODINÁMICOS DE LOS PROCESOS PIROMETALÚRGICOS</b>	1.1 Generalidades sobre los procesos pirometalúrgicos 1.2 Herramientas de la pirometalurgia 1.3 Bases termodinámicas 1.3.1 Construcción e interpretación del diagrama de Kelloggs 1.3.2 Construcción e interpretación de diagramas de Ellingham 1.4 Diagramas de equilibrio binario y ternario
2	<b>PRETRATAMIENTO DE CONCENTRADOS</b>	2.1 Secado y Calcinación 2.2 Tostación 2.3 Termodinámica aplicable en tostación 2.4 Cinética de las reacciones gas – sólido 2.5 Procesos de Aglomeración 2.6 Sinterización del Pb y Fe 2.7 Peletización 2.8 Briquetización
3	<b>PROCESOS DE FUSIÓN Y CONVERSIÓN</b>	3.1 Fusión 3.1.1 Formación de mata y escoria 3.1.2 Bases termodinámicas 3.2 Fundamentos de las escorias 3.3 Procesos de fusión 3.4 Hornos de reverbero 3.5 Hornos de fusión instantánea 3.6 Hornos eléctricos 3.7 Conversión 3.8 Fundamentos de conversión 3.9 Procesos de conversión 3.10 Fusión y conversión continua de cobre

4	<b>PROCESOS DE REDUCCIÓN</b>	4.1 Termodinámica de Óxido-Reducción 4.2 Presión de equilibrio del Oxígeno 4.3 Diagrama: Energía libre – Temperatura 4.4 Altos Hornos 4.5 Generalidades 4.6 Altos hornos de hierro, plomo y plomo – zinc 4.6.1 Nuevas tecnologías sustentables 4.7 Reducción electrotérmica
5	<b>PROCESOS DE REFINACIÓN</b>	5.1 Procesos metal – escoria 5.2 Oxidación de impurezas 5.3 Reacciones de formación 5.4 Purificación de metales no ferrosos 5.5 Reacciones desoxidación 5.6 Procesos metal – metal y metal – compuesto 5.7 Descenso de solubilidad 5.8 Procesos metal – gas y metal – vapor. 5.9 Tratamiento de gases y partículas residuales

## 7. Actividades de aprendizaje de los temas

<b>1. Fundamentos termodinámicos de los procesos pirometalúrgicos</b>	
<b>Competencias</b>	<b>Actividades de aprendizaje</b>
<p>Específicas:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● Reconoce los procesos pirometalúrgicos de acuerdo con sus características fundamentales.</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</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, interpretar y analizar diagramas de fases, 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</li> </ul>

<p>conocimiento en práctica.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● Capacidad de aprender.</li> <li>● Habilidad de trabajo autónomo</li> </ul>	<p>reacciones y aplicarla como información adicional a las bases termodinámicas para el análisis en el comportamiento de los procesos pirometalúrgicos.</p>
<p><b>2. Pretratamiento de Concentrados</b></p>	
<p>Competencias</p>	<p>Actividades de aprendizaje</p>
<p>Específicas: Enlista y describe los tipos de tratamientos usados para preparar el material concentrado para su subsecuente proceso de recuperación en pirometalurgia.</p> <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</li> </ul>

	<p>entre los distintos tipos de aglomeración aplicados al óxido de hierro.</p> <ul style="list-style-type: none"> <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>
<b>3. Procesos de Fusión y Conversión</b>	
Competencias	Actividades de aprendizaje
<p>Específicas: Establece el propósito y describe las operaciones de fusión y conversión aplicadas a concentrados de sulfuros.</p> <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 e incluir 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. 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> </ul>

	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Investigar 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 algunos procesos que generan mayor consumo de energía y fundamentar cuál proceso es más eficiente en este aspecto.</li> </ul>
<b>4. Procesos de Reducción</b>	
Competencias	Actividades de aprendizaje
<p>Específicas: Ilustra los principios fundamentales de los procesos de reducción y su aplicabilidad en procesos industriales.</p> <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> </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>5. Procesos de Refinación</b>	
Competencias	Actividades de aprendizaje

<p>Específicas:</p> <ul style="list-style-type: none"><li>● Visualiza que los procesos de refinación pirometalúrgicos son comercialmente utilizados para la purificación de productos.</li><li>● Identifica la aplicación de los procesos de refinación metalúrgicos.</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></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>● Crear un mapa conceptual de los propósitos de la refinación sólo para los procesos pirometalúrgicos, así como sus ventajas comerciales por la que se desarrollan 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><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)

Se realizan en la asignatura de Laboratorio de Metalurgia Extractiva.

## 9. Proyecto de asignatura

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.

Atender en forma generalizada las particularidades ambientales que pueden generarse en el proceso.

## 10. Evaluación por competencias

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



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)

## 11. Fuentes de información

1. Rosenqvist, T. (1987) Fundamentos de Metalurgia Extractiva; Editorial Limusa
2. Ballester, A.; Verdeja, L. F.; Sancho, J. (1982) Metalurgia Extractiva Vol. I y II; Editorial Síntesis; Madrid, España.
3. Davenport, W.G; King, M.; Schlesinger, M. (2000). Extractive Metallurgy of Copper. Cuarta Edición; Ed. Pergamon; Ottawa, Canada.
4. Habashi, F.; (1997) Handbook of Extractive Metallurgy Vol I, II y III; Ed. Wiley VCH, Quebec, Canadá.
5. Autores varios. Unit Process in Extractive Metallurgy - Pirometalurgia. Curso tutorial de Montana College of Mineral Science and Technology.
6. 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.
7. Sohn, H.Y.; Wadsworth, M.E. (1986) Cinética de los procesos de la Metalurgia Extractiva. Editorial Trillas. México