

1. Datos Generales de la asignatura

Nombre de la asignatura:	Electrometalurgia
Clave de la asignatura:	MEF – 1605
SATCA¹:	3-2-5
Carrera:	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 electrometalúrgicos y el campo de aplicación de los mismos, seleccionar un material para proteger a otro de la corrosión así como cuantificar la producción de metal que se produce vía electrólisis considerando las variables de operación más importantes.

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 principales procesos electrometalúrgicos: galvanoplastia, electroobtención y electrorefinación, en solución acuosa y sales fundidas, así como los principios fundamentales de la corrosión. El análisis involucra tanto los aspectos teóricos como los conceptuales de la tecnología empleada y prácticas a nivel laboratorio que permitirán hacerlo de una manera más completa.

Esta asignatura aporta al perfil del Ingeniero Químico:

- ✓ Los fundamentos básicos de la electrólisis y las características de las reacciones electroquímicas.
- ✓ El conocimiento y operación de los procesos electroquímicos en la industria metalúrgica tales como: disolución, electro-refinación, electro-beneficio y la deposición electrolítica.
- ✓ Los principios básicos de la corrosión y la forma de controlarla.

¹ Sistema de Asignación y Transferencia de Créditos Académicos

Intención didáctica

Este curso tiene como objetivo el lograr que el alumno comprenda los fundamentos termodinámicos y cinéticos en que se basan los procesos electrometalúrgicos: electrobeneficio, refinación electrolítica y galvanoplastia, así como los aspectos operativos de los mismos con el fin de analizar su aplicabilidad a casos particulares.

El programa está desglosado en nueve unidades, que fueron diseñadas para realizar un aprendizaje significativo a través de actividades que se rigen bajo las bases del aprendizaje colaborativo, prácticas de laboratorio y visitas industriales.

En la primera unidad, se atenderán los conceptos básicos por medio de la introducción, definiciones, principios y conceptos de electrometalurgia,

Mientras que la segunda unidad está dedicada al electrobeneficio de soluciones acuosas y particularmente al estudio de los procesos electrometalúrgicos de metales no ferrosos (Cu, Ni, Zn, Pb).

En la tercera unidad se presenta el electrobeneficio a partir de sales fundidas en procesos tales como la obtención de aluminio y de sodio.

La unidad siguiente trata de la electrorrefinación en soluciones acuosas, mientras que la unidad cinco es para la electrorrefinación con sales fundidas.

El tema tratado en la unidad seis es la disolución anódica de sulfuros.

La fabricación de polvos metálicos vía electrólisis es el concepto desarrollado en la unidad 7.

La galvanoplastia o procesos de depósito electrolítico es el tema correspondiente a la unidad 8 y por último en la unidad nueve se presentan lo más relevante y relativo a la corrosión.

Al finalizar todos estos apartados, se le guiará al estudiante para la conformación de un proyecto integrador en el área de los procesos electrometalúrgicos, 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"> ✓ Conoce los fundamentos básicos de la electrólisis, las características de las reacciones electroquímicas, adquiere habilidad para describir celdas e interfaces y para la selección de materiales en sistemas electrometalúrgicos. ✓ Describe celdas e interfaces. ✓ Opera celdas electroquímicas en laboratorio. ✓ Analiza los procesos electrometalúrgicos e identifica las variables clave. ✓ Aplica técnicas anticorrosión.

5. Competencias previas

<ul style="list-style-type: none"> ✓ Conoce los fundamentos básicos, y el origen de los procesos de purificación y/o preparación de los minerales utilizados industrialmente. Los diferentes campos de aplicación de los minerales industriales, los requisitos que deben de satisfacer y los
--

procesos de obtención de los productos terminados.

- ✓ Resuelve balances macroscópicos de materia y energía asociados a los procesos metalúrgicos.
- ✓ Conoce los fundamentos y las técnicas físicas, para la concentración de los materiales utilizando diferentes procesos. Entre otros la concentración gravimétrica, separación magnética y electrostática y la flotación.
- ✓ Conoce los fundamentos fisicoquímicos para la extracción de valores metálicos de soluciones acuosas. Es capaz de: analizar los procesos de extracción, de seleccionar métodos de lixiviación y de aplicarlos a procesos de lixiviación de minerales.
- ✓ Analiza los procesos pirometalúrgicos de acuerdo con las características y principios que los rigen.
- ✓ Aplica sus conocimientos de termodinámica y fenómenos de transporte para la resolución de problemas típicos en la pirometalurgia

6. Temario

No.	Temas	Subtemas
1.	INTRODUCCIÓN, DEFINICIONES, PRINCIPIOS Y CONCEPTOS DE ELECTROMETALURGIA.	1.1 Fundamentos de electrometalurgia. 1.2 Equilibrio químico. 1.4 Equilibrio electroquímico. 1.4 Potencial de equilibrio. 1.5 Pilas electroquímicas. 1.6 Interpretación física del potencial reversible de un electrodo. 1.7 Distribución de corriente en celdas electroquímicas.
2.	ELECTROBENEFICIO A PARTIR DE SOLUCIONES ACUOSAS.	2.1 Estudio de los procesos electrometalúrgicos de metales no ferrosos (Cu, Ni, Zn, Pb, Co, Au and Ag). 2.2 Descripción de operación en planta. 2.3 Optimización y control.

3.	ELECTROBENEFICIO A PARTIR DE SALES FUNDIDAS.	3.1. Proceso de Obtención de Aluminio. 3.2. Proceso de Obtención de Sodio. 3.3. Proceso de Obtención de Magnesio. 3.4. Proceso de Obtención de Litio. 3.3. Optimización y control
4.	ELECTRORREFINACIÓN EN SOLUCIONES ACUOSAS.	4.1. Procesos de electrorrefinado de cobre, plomo, plata y oro. 4.2. Cálculo y diseño de celdas. 4.3. Optimización y control. 4.4. Control de efluentes.
5	ELECTRORREFINACIÓN CON SALES FUNDIDAS.	5.1. Refinación por electroescoria, 5.2. Refinación por electrobeam.
6	DISOLUCIÓN ANÓDICA DE SULFUROS.	6.1. Comportamiento electroquímico de los minerales. 6.2. Proceso de disolución anódica. 6.3. Casos Típicos.
7	FABRICACIÓN DE POLVOS METÁLICOS VÍA ELECTRÓLISIS.	7.1. Variables que afectan la fabricación de polvos metálicos. 7.2. Estudio de casos típicos. 7.3. Optimización y control.
8	PROCESOS DE DEPÓSITO ELECTROLÍTICO (GALVANOPLASTIA)	8.1. Preparación de superficies. 8.2. Procesos típicos y secuencias de operación 8.3. Control de efluentes. 8.4. Pruebas de los depósitos electrolíticos.
9	CORROSIÓN	9.1 Introducción 9.2 Termodinámica de las reacciones de corrosión 9.3 Superficies e interfaces 9.4 Cinética de las reacciones de corrosión. 9.5 Pasivacion 9.6 Mecanismos de corrosión. 9.7 Corrosión atmosférica.

7. Actividades de aprendizaje de los temas

Tema 1. Introducción, Definiciones, Principios y Conceptos de Electrometalurgia.	
Competencias	Actividades de aprendizaje
<p>Específica(s):</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ Explica la Ley de Faraday. ✓ Describe las celdas electroquímicas. ✓ Opera celdas electroquímicas en el laboratorio. <p>Genéricas:</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ Capacidad de análisis y síntesis. ✓ Habilidades en el uso de tecnologías de la información. ✓ Capacidad de comunicación oral y escrita. ✓ Solución de problemas. ✓ Trabajo en equipo. ✓ Capacidad de aplicar el conocimiento en práctica. ✓ Capacidad de aprender. ✓ Habilidad de trabajo autónomo y en equipo. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Describir los fundamentos de los procesos electrometalúrgicos. ✓ Elaborar un reporte sobre las implicaciones de la Ley de Faraday. ✓ Participar en equipo en la fabricación de una Pila y realiza su presentación ante el resto del grupo. ✓ Participar en grupo en una plática sobre el Manejo de Residuos Sólidos y Peligrosos. ✓ Realizar práctica: Comprobación de la Ley de Faraday. ✓ Presentar reporte de práctica realizada, considerando los siguientes puntos: Portada, introducción, Equipo, Materiales y Reactivos, Procedimiento, Resultados, Conclusiones y Bibliografía. ✓ Calcular cantidad de metal depositado aplicando la Ley de Faraday. ✓ Enlistar las variables que afectan la eficiencia de corriente de un proceso electrometalúrgico y el tipo de depósito producido. ✓ Calcular el potencial de celda. ✓ Calcular la cantidad de metal depositado y el consumo de energía de procesos electrometalúrgicos. ✓ Revisar los diferentes tipos y diseños de celdas y características generales de los electrodos.

Tema 2. Electrobeneficio a Partir de Soluciones Acuosas	
Competencias	Actividades de aprendizaje
<p>Específica(s):</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ Visualiza que los procesos de beneficio a partir de soluciones acuosas son utilizados industrialmente para la producción de metales ferrosos como: Cu, Ni, Zn, Pb, and Ag ✓ Enlista y describe los procesos de electro-beneficio para metales no ferrosos ✓ Identifica los correspondientes aspectos ambientales. <p>Genéricas:</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ Capacidad de análisis y síntesis. ✓ Habilidades en el uso de tecnologías de la información. ✓ Capacidad de comunicación oral y escrita. ✓ Solución de problemas. ✓ Trabajo en equipo. ✓ Capacidad de aplicar el conocimiento en práctica. ✓ Capacidad de aprender. ✓ Habilidad de trabajo autónomo. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Enlistar los aspectos generales de los procesos de electrobeneficio a partir de soluciones acuosas. ✓ Investigar las variables de operación de los procesos de electrobeneficio de los principales metales No Ferrosos: Cu, Zn, Pb, Cd, Co, Ni, Ag, Au y presentar frente a grupo. ✓ Realizar cálculos de consumo específico de energía. ✓ Realizar práctica de laboratorio: Electrodeposición de un metal. ✓ Presentar reporte de práctica realizada, considerando los siguientes puntos: Portada, introducción, Equipo, Materiales y Reactivos, Procedimiento, Resultados, Conclusiones y Bibliografía. ✓ Realizar visita: Planta de Zinc MMP ✓ Presentar reporte de visita con los siguientes puntos: Portada, Introducción, Antecedentes, Informe de la visita, información e investigación adicional, Observaciones, Propuestas, Conclusiones y Bibliografía
Tema 3. Electrobeneficio a Partir de Sales Fundidas	
Competencias	Actividades de aprendizaje
<p>Específica(s):</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ Describe los procesos de Obtención de Aluminio, 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Describir mediante un diagrama de flujo, el proceso de beneficio del Al y Na ✓ Investigar las diferencias en procesos de

<p>Sodio, Magnesio y Litio.</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ Identifica aspectos ambientales asociados. <p>Genéricas:</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ Capacidad de análisis y síntesis. ✓ Habilidades en el uso de tecnologías de la información. ✓ Capacidad de comunicación oral y escrita. ✓ Solución de problemas. ✓ Trabajo en equipo. ✓ Capacidad de aplicar el conocimiento en práctica. ✓ Capacidad de aprender. ✓ Habilidad de trabajo autónomo. 	<p>producción de Al y Na</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ Describir los tipos de equipos utilizados ✓ Investigar las variables de operación de los procesos de producción de Mg y Li. ✓ Presentar reporte de la investigación, cumpliendo con los siguientes puntos: Portada, Introducción, Investigación realizada, Observaciones, Conclusiones y Bibliografía.
---	---

Tema 4. Electrorrefinación en Soluciones Acuosas

Competencias	Actividades de aprendizaje
<p>Específica(s):</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ Describe el Proceso de electrorrefinado de cobre, plomo, plata y oro. ✓ Calcula y diseña celdas. ✓ Identifica los aspectos ambientales relacionados.. <p>Genéricas:</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ Capacidad de análisis y síntesis. ✓ Habilidades en el uso de tecnologías de la información. ✓ Capacidad de comunicación oral y escrita. ✓ Solución de problemas. ✓ Trabajo en equipo. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Consultar las variables de operación de los procesos de electrorrefinación de plomo, plata y oro. ✓ Elaborar reporte de consulta de la producción mundial e internacional de cobre, así como los diferentes métodos utilizados. ✓ Realizar cálculo de consumo específico de energía. ✓ Elaborar una tabla comparativa de las variables de operación de los procesos de EW y ER del Cobre. ✓ Práctica de electro-refinación. ✓ Presentar reporte de práctica realizada, considerando los siguientes puntos: Portada, Introducción, Equipo, Materiales y Reactivos,

<ul style="list-style-type: none"> ✓ Capacidad de aplicar el conocimiento en práctica. ✓ Capacidad de aprender. ✓ Habilidad de trabajo autónomo. 	Procedimiento, Resultados, Conclusiones y Bibliografía.
Tema 5. Electrorrefinación con Sales Fundidas	
Competencias	Actividades de aprendizaje
<p>Específica(s):</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ Describe el método de electro-refinación, su propósito y aplicaciones. ✓ Identifica los correspondientes aspectos ambientales.. <p>Genéricas:</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ Capacidad de análisis y síntesis. ✓ Habilidades en el uso de tecnologías de la información. ✓ Capacidad de comunicación oral y escrita. ✓ Solución de problemas. ✓ Trabajo en equipo. ✓ Capacidad de aplicar el conocimiento en práctica. ✓ Capacidad de aprender. ✓ Habilidad de trabajo autónomo. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Investigar los procesos de electroslog y electrobeam. ✓ Elaborar un cuadro comparativo en donde se describan las técnicas de electro-refinación. ✓ Realizar práctica de electro-refinación de Cobre. ✓ Presentar reporte de práctica realizada, considerando los siguientes puntos: Portada, introducción, Equipo, Materiales y Reactivos, Procedimiento, Resultados, Conclusiones y Bibliografía.
Tema 6. Disolución Anódica de Sulfuros	
Competencias	Actividades de aprendizaje
<p>Específica(s):</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ Enlista y describe los 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Establecer las generalidades, aplicaciones y ejemplos de los procesos de disolución anódica de sulfuros en un cuadro sinóptico.

<p>procesos típicos de disolución anódica</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ Identifica los correspondientes aspectos ambientales.. <p>Genéricas:</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ Capacidad de análisis y síntesis. ✓ Habilidades en el uso de tecnologías de la información. ✓ Capacidad de comunicación oral y escrita. ✓ Solución de problemas. ✓ Trabajo en equipo. ✓ Capacidad de aplicar el conocimiento en práctica. ✓ Capacidad de aprender. ✓ Habilidad de trabajo autónomo. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Enlistar las ventajas y desventajas de este tipo de procesos electrometalúrgicos. ✓ Describir mediante un diagrama de flujo, cualquier proceso de disolución anódica.
---	--

Tema 7. Fabricación de Polvos Metálicos Vía Electrólisis

Competencias	Actividades de aprendizaje
<p>Específica(s):</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ Define las variables que afectan la fabricación de polvos metálicos. ✓ Reconoce los equipos utilizados para las operaciones básicas y los instrumentos de control del proceso. <p>Genéricas:</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ Capacidad de análisis y síntesis. ✓ Habilidades en el uso de tecnologías de la información. ✓ Capacidad de comunicación 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Identificar los diferentes procesos para producción de polvos. ✓ Describir mediante el uso de un diagrama de flujo, el proceso de fabricación de polvos metálicos, vía electrólisis. ✓ Elaborar una relación de los equipos utilizados, describiendo sus características principales. ✓ Identificar los instrumentos de control que son utilizados en el proceso.

<p>oral y escrita.</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ Solución de problemas. ✓ Trabajo en equipo. ✓ Capacidad de aplicar el conocimiento en práctica. ✓ Capacidad de aprender. ✓ Habilidad de trabajo autónomo. 	
<p align="center">Tema 8. Procesos de Depósito Electrolítico</p>	
Competencias	Actividades de aprendizaje
<p>Específica(s):</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ Conoce el método de electrodeposición y el principio que lo rige. ✓ Describe el proceso de galvanoplastia y la celda galvánica. ✓ Conoce las múltiples aplicaciones de esta técnica. <p>Genéricas:</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ Capacidad de análisis y síntesis. ✓ Habilidades en el uso de tecnologías de la información. ✓ Capacidad de comunicación oral y escrita. ✓ Solución de problemas. ✓ Trabajo en equipo. ✓ Capacidad de aplicar el conocimiento en práctica. ✓ Capacidad de aprender. ✓ Habilidad de trabajo autónomo. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Organizar un mapa mental sobre el proceso de electrodeposición. ✓ Realizar un diagrama de flujo de las diferentes etapas para la preparación de una pieza para este tipo de procesos. ✓ Elaborar una tabla en la que se incluyan las principales variables de operación de los procesos de galvanoplastia más utilizados. ✓ Enlistar las aplicaciones de los procesos de galvanoplastia. ✓ Realizar práctica de electro-deposición. ✓ Presentar reporte de práctica realizada, considerando los siguientes puntos: Portada, Introducción, Equipo, Materiales y Reactivos, Procedimiento, Resultados, Conclusiones y Bibliografía. ✓ Realizar visita a planta de cromado ✓ Presentar reporte de visitas con los siguientes puntos: Portada, Introducción, Antecedentes, Informe de la visita, información e investigación adicional, Observaciones, Propuestas, Conclusiones y Bibliografía

Tema 9. Corrosión	
Competencias	Actividades de aprendizaje
<p>Específica(s):</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ Describe el Proceso de corrosión, ✓ Interpreta los diagramas de Pourbaix ✓ Identifica las técnicas anticorrosivas disponibles. <p>Genéricas:</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ Capacidad de análisis y síntesis. ✓ Habilidades en el uso de tecnologías de la información. ✓ Capacidad de comunicación oral y escrita. ✓ Solución de problemas. ✓ Trabajo en equipo. ✓ Capacidad de aplicar el conocimiento en práctica. ✓ Capacidad de aprender. ✓ Habilidad de trabajo autónomo. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Investigar los fundamentos principales del proceso de corrosión. ✓ Analizar las diferentes técnicas para protección contra la corrosión y realizar una tabla con las ventajas y desventajas de cada una. ✓ Seleccionar el material para proteger cierto material, empleando el diagrama de Pourbaix. ✓ Realizar práctica de electro-depositación. ✓ Presentar reporte de práctica realizada, considerando los siguientes puntos: Portada, Introducción, Equipo, Materiales y Reactivos, Procedimiento, Resultados, Conclusiones y Bibliografía. ✓ Realizar visita a CFE/Pemex en área de protección catódica ✓ Presentar reporte de visitas con los siguientes puntos: Portada, Introducción, Antecedentes, Informe de la visita, información e investigación adicional, Observaciones, Propuestas, Conclusiones y Bibliografía. ✓ Redactar las conclusiones de la unidad vista.

8. Práctica(s)

<ul style="list-style-type: none"> ✓ Comprobación de ley de Farady ✓ Fabricación de una pila. ✓ Electrorefinacion ✓ Galvanizado ✓ Electrodeposición de un metal
--

9. Proyecto de asignatura

El proyecto consiste en la elaboración de un proceso que comprenda la obtención de un metal por vía electrometalúrgica, desde su diseño hasta la puesta en marcha de un circuito electrometalúrgico a nivel laboratorio.

- ✓ **Fundamentación.** El alumno realiza una búsqueda bibliográfica del proceso de producción de Zinc por vía electrometalúrgica y realiza una visita al área de electrólisis de la planta electrolítica de Zinc de la empresa Metalúrgica Met-Mex Peñoles para observar las variables de operación de dicho proceso e identificar áreas de oportunidad para optimizar el proceso.
- ✓ **Planeación.** Se le proporciona al alumno solución de sulfato de Zinc ya purificada para ser sometida a electrólisis y obtener Zinc de alta pureza. Los alumnos, por equipos, realizan el diseño del proceso para su tratamiento y recuperación vía electrólisis así como el diagrama de flujo del proceso para Electroobtención de Zinc, enlistan los materiales y equipos requeridos para dicho proceso.
- ✓ **Ejecución.** Los alumnos a nivel laboratorio, llevan a cabo lo plasmado en la etapa de planeación. Identifican el tipo de depósito, miden las variables de operación, pesan el metal depositado, calculan la eficiencia de corriente (aplicando la Ley de Faraday) y reflexionan sobre posibles errores cometidos durante el proceso. Además, le dan un tratamiento al electrolito agotado para su disposición adecuada.
- ✓ **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 y de acuerdo a lo que ellos manipulan en la práctica identifican posibles maneras de optimización 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
- ✓ Proyecto de asignatura
- ✓ 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

Ballester A., V. L. (s.f.). *Metalurgia Extractiva Vol. I y II*. Madrid: Síntesis.

Habashi, F. (1997). *Handbook of extractive metallurgy*. Québec: WILEY-VCH.

Mihovilovic, E. M. (s.f.). Precipitación por electrólisis. En E. M. Mihovilovic, *Hidrometalurgia: fundamentos, procesos y aplicaciones* (págs. 615-681).

Curso de Hidrometalurgia. Universidad de Atacama.