TEMA 1:
LA INGENIERÍA QUÍMICA Y SU ENTORNO. CONCEPTOS FUNDAMENTALES

F.E Jarabo Friedrich
F.J. García Álvarez

BY NC SA

1.1 Evolución histórica de la industria química

Industria química:
Industria que se ocupa de transformar químicamente materias primas o productos iniciales (de origen natural) en otros de mayor interés, valor añadido y utilidad.

Elaboración de productos naturales usando el fuego:
Cocción cerámica, preparación de pigmentos, obtención de vidrio y metales, conservación de alimentos y otras materias orgánicas.

Evolución artesanal y movimiento alquimista (siglo XIV):
Relación de ciencia y tecnología experimentando al azar (destiladores, cristalizadores, evaporadores, hornos).

F.E Jarabo Friedrich
F.J. García Álvarez
BY NC SA

Revolución Industrial (Gran Bretaña, siglo XVIII): Invención de la máquina de vapor aplicada a nuevas industrias; textil, papel, jabón, vidrio; se necesitaban grandes cantidades de **ácidos y álcalis fuertes**.

Procesos innovadores:

- Obtención de ácido sulfúrico por el método de las cámaras de plomo (Roerbruck, 1749).
- Obtención de carbonato sódico mediante el proceso Leblanc (Leblanc, 1789).

F.E. Jarabo Friedrich
F.J. García Álvarez
CC BY NC SA

En siglo XIX se establecen las **leyes químicas**: Avanza la industria química, descubriéndose nuevos productos y procesos; colorantes artificiales, neumáticos, productos farmacéuticos, explosivos, plásticos.

Renovación de los procesos clásicos:

- Obtención de ácido sulfúrico por el método de contacto (Phillips, 1870).
- Obtención de carbonato sódico mediante el proceso Solvay (Solvay, 1863).

F.E Jarabo Friedrich
F.J. García Álvarez
BY NC SA

Principios del siglo XX:
Importante desarrollo de la industria química en Alemania; proceso Haber-Bosch de síntesis de amoníaco, desarrollado por BASF en 1913.

I Guerra Mundial:
En EE.UU. desarrollan plantas de amoníaco para producir explosivos y craqueo térmico para obtener gasolina para los automóviles que Ford fabrica en serie.

II Guerra Mundial:
En EE.UU. desarrollan el proceso de fabricación de caucho artificial para producir neumáticos y el de reformado catalítico para obtener combustible octanado para aviones de combate; en Alemania desarrollan la obtención de gasolinas a partir de carbón y gas natural (proceso Fischer-Tropsch).

F.E. Jarabo Friedrich
F.J. García Álvarez
CC BY NC SA

En la segunda mitad del siglo XX se desarrolla la Petroleoquímica (combustibles, plásticos, química fina) compitiendo al mismo nivel las industrias químicas alemanas (BASF, Bayer, Hoechst) y estadounidenses (Du Pont).

A principios del siglo XXI la industria química está madura y ha evolucionado respecto a dos condicionantes externos: crisis energética y deterioro del medio ambiente.

F.E Jarabo Friedrich
F.J. García Álvarez
CC BY NC SA

1.1.1 La industria química en España

España posee algunas materia primas (pirita, sal común, silvinita), pero se incorpora tarde al movimiento social producido por la Revolución Industrial.

A finales del siglo XIX se comienzan a instalar empresas químicas en España, pero el estancamiento económico debido a la I Guerra Mundial, a la recesión de 1928 y a la Guerra Civil Española limitan el desarrollo (CEPSA, 1930; UNQUINESA, 1939).

Los Planes de Desarrollo (1964) crean los “polos” de Huelva, Tarragona y Puertollano, principalmente dedicados a la Petroleo-química.

Debido a su dependencia del petróleo, se produce una crisis en la industria química española entre 1975 y 1981.

F.E Jarabo Friedrich
F.J. García Álvarez
CC BY NC SA

En la década de 1980 se supera la crisis racionalizando los procesos productivos, pero en la década de 1990 vuelve a producir-se una crisis de inversión y producción debido a la globalización de los mercados.

A comienzos del siglo XXI el futuro de la industria química española está ligado al de la Unión Europea, siendo necesario favorecer innovaciones tecnológicas que mejoren la competitividad.

F.E Jarabo Friedrich
F.J. García Álvarez
BY NC SA

1.2 Los procesos químicos actuales

Los **procesos** químicos los llevan a cabo las **empresas** químicas, que fabrican sus productos en la **plantas** químicas.

Factores que determinan la **localización de la planta** química:

- Posibilidad comercial del producto: Capacidad de producción.
- Disponibilidad y coste de materias primas: Selección de la fuente de suministro.
- Tecnología disponible: Elección del procedimiento.
- Servicios auxiliares necesarios: Combustibles, electricidad, agua, vapor.
- Consideraciones socio-económicas: Disponibilidad y coste de la mano de obra, coste del terreno, incentivos económicos.
- Consideraciones ambientales: Normativa legal, mercado de subproductos.

F.E Jarabo Friedrich
F.J. García Álvarez
CC BY NC SA

Características de la industria química:

- Elevada inversión en investigación y desarrollo (I+D) de nuevos productos.
- Reducción del intervalo de tiempo comprendido entre la aparición de un nuevo producto y su fabricación industrial.
- Gran cantidad de capital necesario para la construcción y puesta en marcha de una planta industrial.
- Creciente automatización de los procesos.
- Disminución progresiva de la mano de obra necesaria, debido a la automatización.
- Aumento de la fracción de capital invertido en ahorro de energía y depuración.
- Tendencia a la integración vertical de la actividad empresarial (obtención de toda una gama de productos, desde los más básicos hasta los más transformados), para absorber las fluctuaciones en la demanda de productos.

F.E Jarabo Friedrich
F.J. García Álvarez
CC BY NC SA

Tipos de productos químicos:

- **Productos básicos** (*commodities*): son aquéllos de gran volumen de producción y coste reducido obtenidos a partir de las materias primas naturales, utilizándose cada uno de ellos en la fabricación de un gran número de otros más elaborados (*ácido sulfúrico, amoníaco, etileno*).
- **Productos intermedios** (*pseudocommodities*): son aquéllos de gran volumen de producción que se obtienen a partir de materias primas o de productos básicos, utilizándose cada uno de ellos en la fabricación de unos pocos productos más elaborados (fenol, cloruro de vinilo).
- **Productos de química fina** (*fine chemicals*): son aquellos productos intermedios de elevada pureza y especificaciones rigurosas, obtenidos en cantidades moderadas, y que se emplean en la fabricación de aditivos, fármacos o reactivos (aminoácidos, vitaminas).
- **Especialidades** (*specialties*): son aquellos productos que tienen las características deseada (incluido su envasado) para su utilización final y que se fabrican en menor escala pero en un gran número, siendo su valor añadido muy elevado (insecticidas, detergentes).

F.E Jarabo Friedrich
F.J. García Álvarez
CC BY NC SA

Algunos importantes procesos químicos actuales			
Fuente	Materia prima	Industrias y productos básicos	Utilización
Atmósfera	Aire	Destilación: nitrógeno, oxígeno	Atmósferas inertes Combustiones
Hidrosfera	Agua dulce	Electrólisis: hidrógeno	Hidrogenaciones
	Agua de mar	Evaporación: cloruro sódico Proceso Solvay: carbonato sódico Electrólisis húmeda: cloro, sosa cáustica Electrólisis seca: cloro, sodio	Álcalis Vidrio Cloraciones
		Bromo	Diversos usos

F.E. Jarabo Friedrich
F.J. García Álvarez
CC BY NC SA

Algunos importantes procesos químicos actuales

Fuente	Materia prima	Industrias y productos básicos	Utilización
Litosfera	Sílice	Industria del vidrio	Construcción, Óptica
	Arcilla	Industria cerámica	Construcción
	Caliza	Horno de cal	Álcalis
		Industria del cemento	Aglomerante
	Yeso	Industria del yeso	Aglomerante
	Azufre y sulfuros metálicos	Industria metalúrgica	Diversos usos
		Tostación: ácido sulfúrico	Abonos
	Rocas fosfáticas	Ácido fosfórico, fosfato potásico	Abonos
	Sales potásicas	Cloruro potásico, nitrato potásico	Abonos
	Carbón	Carboquímica	Colorantes, perfumes Plásticos, cauchos Droguería, farmacia Abonos, explosivos Disolventes, pinturas
	Petróleo	Petroleoquímica	

F.E Jarabo Friedrich
F.J. García Álvarez
BY NC SA

Algunos importantes procesos químicos actuales			
Fuente	Materia prima	Industrias y productos básicos	Utilización
Biosfera	Vegetales	Almidón, sacarosa	Alimentación
		Látex, caucho, aguarrás	Neumáticos Pinturas
		Celulosa, rayón, industria papelera	Papel Vestido
		Algas, agar-agar	Alimentación
	Animales	Leche, lana, huesos, piel	Diversos usos
		Grasas, alcoholes grasos	Jabones Alimentación

F.E Jarabo Friedrich
F.J. García Álvarez
CC BY NC SA

1.3 Racionalización de la industria química: la Ingeniería Química

Ingeniería Química:
Disciplina que aporta un patrón de análisis y solución de los problemas de la industria química.

Orígenes europeos (G.E. Davis, Gran Bretaña, 1887) pero rápida expansión americana (L.M. Norton, EE.UU., 1888); en Alemania prevalece el "ingeniero de procesos" ("Verfahrensingenieur") hasta 1960.

Primera etapa:
Descripción de secuencias de operaciones que tienen lugar en los procesos químicos.

F.E Jarabo Friedrich
F.J. García Álvarez
BY NC SA

Operación básica (A.D. Little, 1918):
Primera herramienta conceptual que considera etapas comunes a diferentes procesos que pueden ser estudiados de forma independiente.

Fenómenos de transporte (R.B. Bird, 1960):
Nuevo concepto que hace énfasis en la comprensión de los principios físicos; las operaciones básicas se fundamentan en el transporte de tres propiedades, cuya analogía puede permitir un tratamiento unificado.

Independencia de las disciplinas madres (generalización y abstracción):
Estudio de los procesos químicos mediante un conocimiento detallado de las operaciones básicas que se fundamentan en el transporte de propiedades (materia, energía, momento), la termodinámica y la cinética química.

F.E. Jarabo Friedrich
F.J. García Álvarez
CC BY NC SA

Etapa de diversificación:
Tecnología ambiental, energética y alimentaria; polímeros, plásticos, materiales cerámicos y materiales compuestos; dinámica, simulación y control de procesos; economía y estrategia de procesos.

Principios del siglo XXI:
Técnicas de cálculo para resolver modelos complejos, utilización de ordenadores como herramientas de análisis y diseño.

F.E. Jarabo Friedrich
F.J. García Álvarez
CC BY NC SA

Tecnologías de tratamiento de residuos		
Tipo de tratamiento	Contaminante tratado	Operación empleada
Efluentes gaseosos		
Físico	Partículas en suspensión	Sedimentación Centrifugación Filtración
	Olores	Adsorción
Químico	Partículas en suspensión	Lavado
	Óxidos de azufre	Absorción
	Óxidos de nitrógeno	Absorción Reducción catalítica

F.E Jarabo Friedrich
F.J. García Álvarez
CC BY NC SA

Tecnologías de tratamiento de residuos

Tipo de tratamiento	Contaminante tratado	Operación empleada
Aguas residuales		
Previo	Sólidos gruesos	Sedimentación Trituración Cribado
	Aceites y grasas	Sedimentación
Primario	Sólidos en suspensión	Sedimentación Floculación Flotación
	Acidez	Neutralización
Secundario	Materia orgánica	Lagunas de aireación Filtros percoladores Fangos activados Digestión aerobia Digestión anaerobia Microfiltración
	Sólidos en suspensión	Sedimentación Flotación

F.E Jarabo Friedrich
F.J. García Álvarez
CC BY NC SA

Tecnologías de tratamiento de residuos

Tipo de tratamiento	Contaminante tratado	Operación empleada
Aguas residuales		
Terciario	Diversos contaminantes específicos	Sedimentación; Filtración Adsorción Intercambio iónico Destilación; Extracción Congelación Ósmosis inversa Electrodiálisis
Diverso	Diversos contaminantes específicos	Precipitación Oxidación Reducción Desorción
	Desinfección	Cloración Ozonización Irradiación

F.E. Jarabo Friedrich
F.J. García Álvarez
CC BY NC SA

Tecnologías de tratamiento de residuos

Tipo de tratamiento	Contaminante tratado	Operación empleada
Residuos sólidos		
Eliminación	Residuos agrarios, urbanos e industriales	Vertido controlado Incineración
Aprovechamiento químico	Residuos agrarios	Compostaje
	Residuos urbanos	Compostaje
	Residuos industriales	Tratamientos específicos
Aprovechamiento energético	Residuos agrarios	Procesos termoquímicos (combustión, gasificación, pirólisis) Procesos bioquímicos (fermentación alcohólica, digestión anaerobia)
	Residuos urbanos	Procesos termoquimicos
Reciclado	Residuos urbanos	Separación selectiva y reutilización

F.E Jarabo Friedrich
F.J. García Álvarez
CC BY NC SA

1.3.1 La Ingeniería Química en España

Modelos paralelos desde 1922 (modelo alemán), adecuados a las circunstancias de la industria química española:

- **Licenciado en Química (Especialidad Industrial)**, por las Facultades de Ciencias o Facultades de Química, considerando la Ingeniería Química como un anexo sobre ingeniería.
- **Ingeniero Industrial (Especialidad Química)**, por las Escuelas Técnicas Superiores de Ingenieros Industriales, considerando la Ingeniería Química como un anexo sobre química.

En la década de 1980 ambas enseñanzas incluían programas homologables internacionalmente; **se hacía Ingeniería Química sin existir Ingenieros Químicos**.
En 1987 se reforman los planes de estudio y se establece el título universitario oficial de Ingeniero Químico. Se dispone así del marco que permitirá desarrollar los contenidos conceptuales propios de la Ingeniería Química de forma independiente

F.E Jarabo Friedrich
F.J. García Álvarez
CC BY NC SA

El llamado “proceso de Bolonia” ya es otra historia

F.E Jarabo Friedrich
F.J. García Álvarez
CC BY NC SA

1.4 Nuevas tendencias de la Ingeniería Química

Procesos:

- Desarrollo de procesos socialmente aceptables.
- Desarrollo de procesos con materias primas alternativas.
- Diseño de plantas de menor tamaño.
- Desarrollo de procesos híbridos.

Productos:

- Productos ambientalmente aceptables.
- Materiales avanzados.
- Productos químicos especiales.

F.E Jarabo Friedrich
F.J. García Álvarez
BY NC SA

Herramientas:

- Instrumentación avanzada.
- Simulación por ordenador.
- Aplicaciones de la inteligencia artificial:
  - Sistemas expertos.
  - Redes neuronales.
  - Lógica difusa.
  - Algoritmos genéticos.

F.E Jarabo Friedrich
F.J. García Álvarez
BY NC SA

Aparatos utilizados para algunas operaciones

Operación	En el laboratorio	En una planta de proceso
Medida de fluidos	Medidores de volumen: ● Probetas ● Pipetas ● Buretas	Medidores de caudal: ● Venturímetros ● Diafragmas ● Rotámetros
Transporte de fluidos	Recipientes: ● Botellas ● Frascos ● Bombonas	Tuberías Aparatos de impulsión: ● Bombas ● Compresores Aparatos de regulación: ● Válvulas
Calentamiento	Mechero Bunsen	Horno
	Manta calefactora	Cambiador de calor: ● de doble tubo ● de carcasa y tubos ● de placas

F.E. Jarabo Friedrich
F.J. García Álvarez
CC BY NC SA

Aparatos utilizados para algunas operaciones		
Operación	En el laboratorio	En una planta de proceso
Enfriamiento	Refrigerante	
Separación líquido-líquido	Embudo de decantación	Sedimentadores: ● Decantador ● Espesador
Separación sólido-líquido	Embudo y papel de filtro Embudo Buchner	Filtros: ● de presión ● de vacío ● centrifugo
Lavado de gases	Burbujeador	Columna de relleno: ● con anillos ● con sillas

F.E Jarabo Friedrich
F.J. García Álvarez
CC BY NC SA

Aparatos utilizados para algunas operaciones		
Operación	En el laboratorio	En una planta de proceso
Destilación	Alambique	Columna de platos: ● perforados ● de campanas
Reacciones químicas	Matraces: ● Erlenmeyer ● Esférico Vasos de precipitado	Reactores: ● tanques agitados ● tubulares
Instrumentación	De análisis químico	De control de procesos

F.E Jarabo Friedrich
F.J. García Álvarez
CC BY NC SA

1.5 Ingeniería Química y procesos industriales

Definición de Ingeniería Química (J. Cathalá, 1951 y M. Letort, 1961):
"Arte de concebir, calcular, diseñar, hacer construir y hacer funcionar instalaciones donde efectuar a escala industrial cualquier transformación química u operación física de separación inmediata".

Disciplina que **sistematiza** los conceptos físicos y químicos para su aplicación al diseño, desarrollo y operación de procesos a **escala industrial**.

Participa en el **sector químico** y en otros sectores industriales:

- Metalurgia
- Producción de energía
- Tecnología ambiental
- Tecnología alimentaria

Industria química: Obtención de **productos** a partir de **materias primas**.

F.E Jarabo Friedrich
F.J. García Álvarez
BY NC SA

Proceso químico: Diversas operaciones relacionadas entre sí; reacciones químicas y operaciones físicas de tratamiento o separación (**Figura** 1.1).

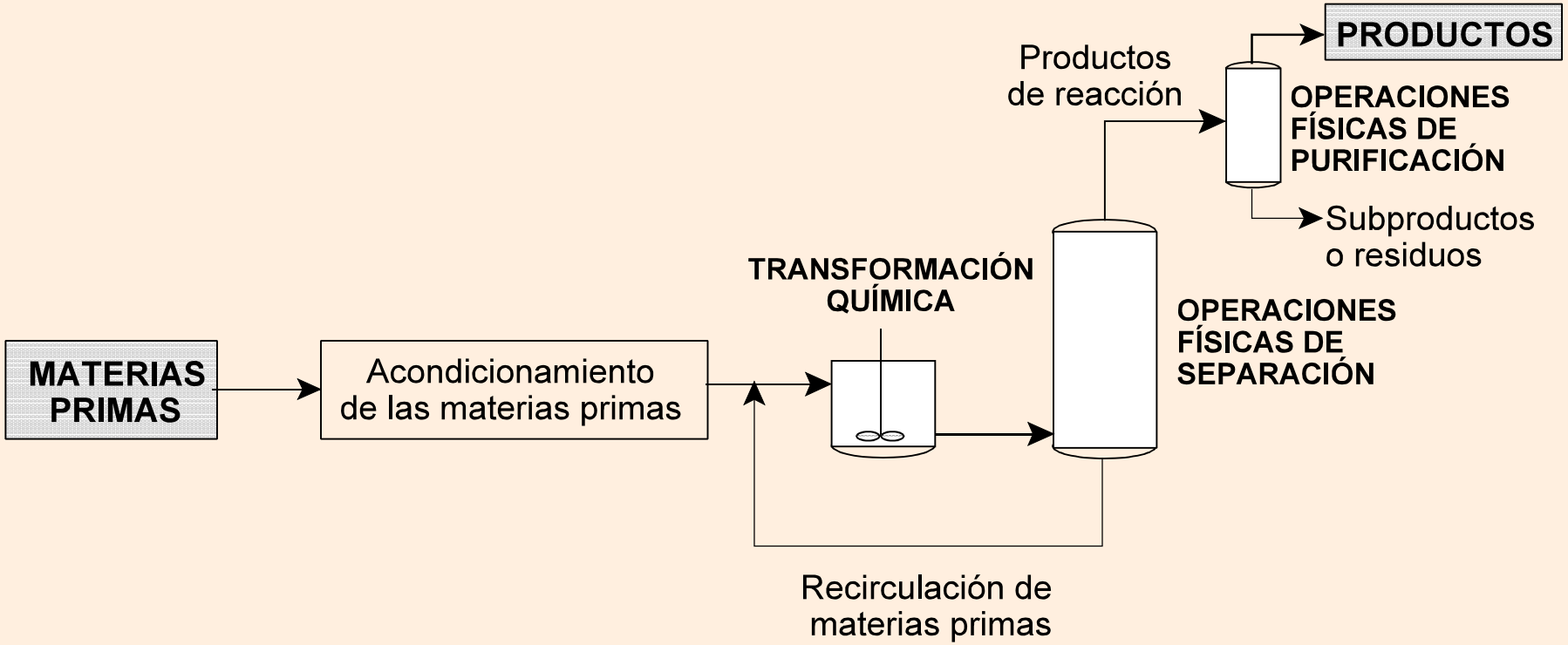

Figura 1.1: Procesos químico-industriales.

F.E Jarabo Friedrich
F.J. García Álvarez
CC BY NC SA

Bases del conocimiento para el estudio de los procesos químicos: (**Figura 1.2**):

- Estado de equilibrio: Equilibrio entre fases, equilibrio químico.
- Procesos cinéticos: Fenómenos de transporte, cinética química.
- **Ecuaciones de conservación** (balances): Materia, energía, momento.
- Aspectos complementarios: Propiedades de los materiales; instrumentación y control; economía, estrategia, optimización.

F.E. Jarabo Friedrich
F.J. García Álvarez
CC BY NC SA

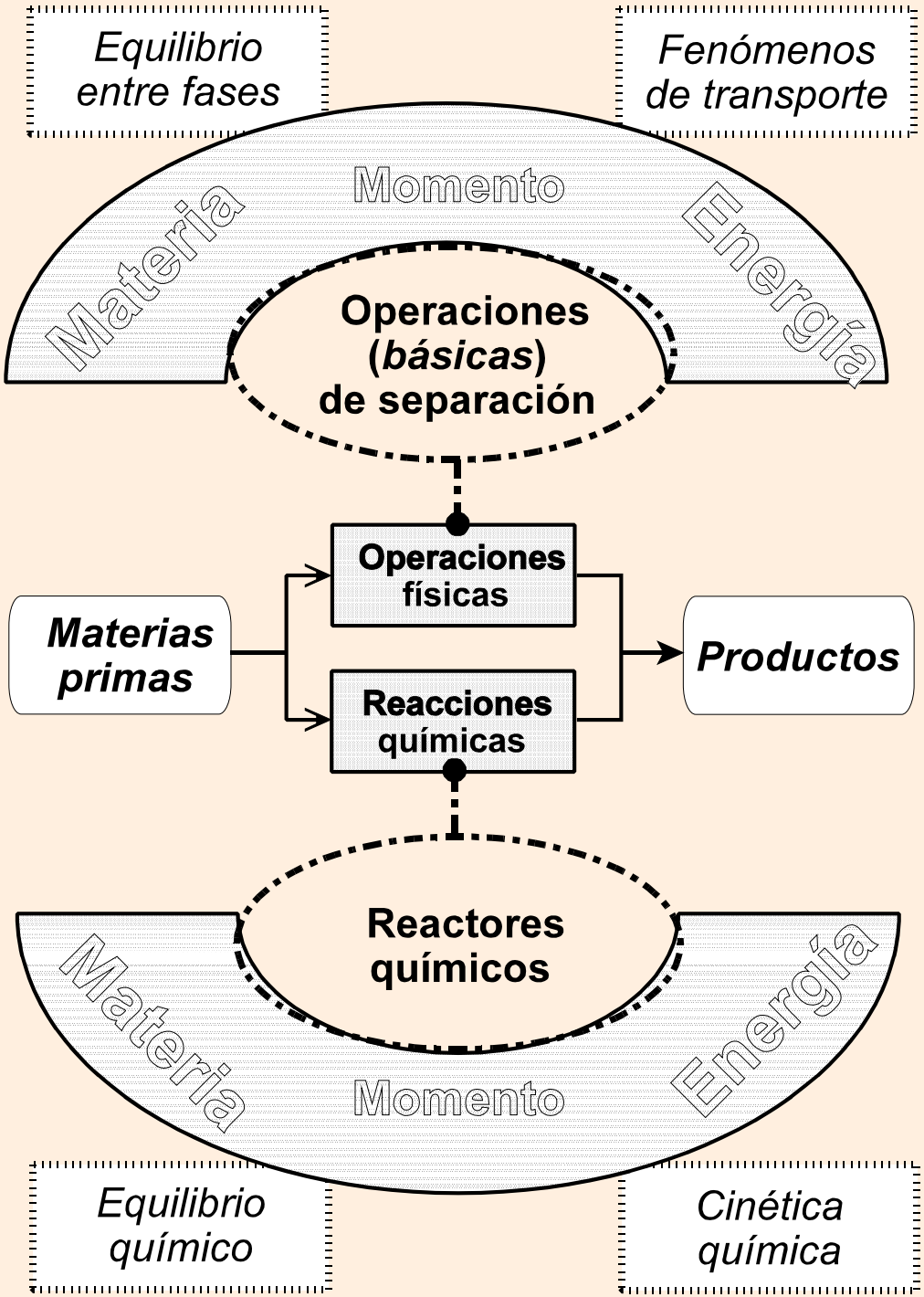

Figura 1.2: Estudio de los procesos químico-industriales.

F.E. Jarabo Friedrich
F.J. García Álvarez
BY NC SA

1.6 Sistemas de magnitudes y unidades

Magnitud: Propiedad o cualidad física susceptible de medida, por loqu que puede ser expresada cuantitativamente.

Unidad: Valor obtenido al fijar arbitrariamente la cantidad de una magnitud y que va a ser utilizada como referencia para medir su valor por comparación.

Sistema de magnitudes: Conjunto de magnitudes **fundamentales** (elegidas arbitrariamente) y **derivadas** (obtenidas a partir de las fundamentales mediante ecuaciones de definición) con las cuáles se pueden definir todas las variables y propiedades que intervienen en un fenómeno.

Sistema de unidades: Conjunto reducido de unidades, elegido arbitrariamente, que permite medir todas las magnitudes.

F.E Jarabo Friedrich
F.J. García Álvarez
BY NC SA

Diversos sistemas de magnitudes (absolutos, técnicos, ingenieriles) y de unidades (métrico, inglés), normalizados por la *XI Conferencia General de Pesas y Medidas* (París, 1960) en el **Sistema Internacional de Unidades, S.I.**, declarado de uso legal en España (Ley 3/1987, de 18 de marzo, de Metrología, y Reales Decretos posteriores que la desarrollan).

Se definen:

- Magnitudes fundamentales básicas y suplementarias.
- Magnitudes derivadas.
- Unidades fundamentales básicas y suplementarias.
- Unidades derivadas.
- Múltiplos, submúltiplos y nombres especiales de unidades.

F.E. Jarabo Friedrich
F.J. García Álvarez
CC BY NC SA

1.6.1 Conversión de unidades

Factor de conversión: Número de unidades de una magnitud de un sistema de unidades en una unidad de la misma magnitud de otro sistema.

Los factores de conversión de las magnitudes fundamentales de los distintos sistemas de unidades son siempre experimentales.

Los factores de conversión de las magnitudes derivadas de los distintos sistemas de unidades se calculan a partir de los factores de conversión de las magnitudes fundamentales.

F.E Jarabo Friedrich
F.J. García Álvarez
BY NC SA

1.6.2 Ecuaciones dimensionales

Dimensión: Característica de una magnitud física expresada en términos de sus unidades fundamentales, de forma simbólica (M, L, t, T).

Las ecuaciones deducidas a partir de leyes físicas son siempre dimensionalmente homogéneas.

Módulo adimensional: Combinación de variables tal, que sus dimensiones se anulan.

Las ecuaciones empíricas deducidas como resultado de la experimentación pueden no ser dimensionalmente homogéneas (por lo que sólo serán válidas si se utilizan con las unidades empleadas para obtenerlas).

Generalmente se representan las ecuaciones empíricas mediante módulos adimensionales con ayuda de una técnica denominada **análisis dimensional**.

F.E Jarabo Friedrich
F.J. García Álvarez
BY NC SA

1.7 Definiciones básicas relativas a un sistema

Sistema: Región del espacio perfectamente definida y circunscrita por unos **límites** a los efectos de su análisis; la región externa a los límites se denomina **entorno**.

La elección de un sistema es **arbitraria**, aunque **no** necesariamente **sencilla**.

Sistema abierto (continuo; con flujo): Sistema en el que se producen intercambios de **materia** con su entorno.

Sistema cerrado (por lotes; sin flujo): Sistema aislado de su entorno.

Propiedad: Característica medible o calculable de un sistema.

F.E Jarabo Friedrich
F.J. García Álvarez
BY NC SA

Propiedad intensiva: Propiedad **independiente** de la cantidad de materia del sistema.

Propiedad extensiva: Propiedad **dependiente** de la cantidad de materia del sistema.

Estado: Conjunto único de propiedades de un sistema en un momento dado; sólo depende de sus propiedades intensivas.

Ecuación de estado: Relación matemática entre las propiedades que caracterizan el estado de un sistema.

Fase: Estado completamente homogéneo y uniforme de la materia.

F.E Jarabo Friedrich
F.J. García Álvarez
BY NC SA

1.8 El estado de equilibrio

Un sistema está en equilibrio cuando su estado no puede experimentar ningún cambio espontáneo.

Características:

- El equilibrio es dinámico, consecuencia de la igualdad de velocidades para alcanzarlo y abandonarlo.
- Un sistema tiende espontáneamente a alcanzar el equilibrio.
- Si se modifica alguno de los factores que determinan el equilibrio, el sistema tenderá a compensar esta modificación (principio de **LeChatelier**).
- El estado de equilibrio no depende del camino seguido para alcanzarlo.
- El equilibrio se logra cuando se compensan dos tendencias opuestas: mínima energía y máxima entropía.

F.E. Jarabo Friedrich
F.J. García Álvarez
CC BY NC SA

Grados de libertad: Número de propiedades de un sistema que definen el estado de equilibrio.

Regla de las fases (Gibbs): Relaciona los grados de libertad con el número de componentes y el número de fases de un sistema:

$$F + L = C + 2 \qquad [1.1]$$

F.E Jarabo Friedrich
F.J. García Álvarez
CC BY NC SA

1.8.1 Equilibrio entre fases

La condición de equilibrio entre fases implica el reparto de cada componente entre las fases según proporciones que sólo dependen de T y P.
Coeficiente de reparto: Relación utilizada para expresar el equilibrio entre las fases:

$$k_i = \frac{y_i}{x_i} \qquad [1.2]$$

- Sistemas líquido - vapor: **Ley de Dalton - Raoult**:

$$\frac{y_i}{x_i} = \frac{P_i^o}{P} \qquad [1.3]$$

- Sistemas líquido - gas: **Ley de Henry**:

$$\frac{y_i}{x_i} = \frac{H_i}{P} \qquad [1.4]$$

F.E Jarabo Friedrich
F.J. García Álvarez
CC BY NC SA

Diagramas de equilibrio: Representaciones gráficas sobre el estado de equilibrio en diferentes condiciones.

F.E. Jarabo Friedrich
F.J. García Álvarez
BY NC SA

1.8.2 Equilibrio químico

Ecuación estequiométrica: Representación de la naturaleza de un cambio químico, según las proporciones (coeficientes estequiométricos) en que se combinan las especies:

$$aA + bB \leftrightarrows rR + sS \qquad [1.5]$$

Constante de equilibrio: Descripción del estado de equilibrio químico; para sistemas ideales (para P y T constantes):

$$K = \frac{C_R^r \, C_S^s}{C_A^a \, C_B^b} \qquad [1.6]$$

F.E. Jarabo Friedrich
F.J. García Álvarez
CC BY NC SA

1.9 La evolución hacia el equilibrio

Los cambios de un sistema que tiende hacia el equilibrio se expresan mediante **leyes cinéticas**, que no están tan bien establecidas como las del estado de equilibrio.

F.E. Jarabo Friedrich
F.J. García Álvarez
BY NC SA

1.9.1 Fenómenos de transporte

La velocidad con la que un sistema evoluciona hacia el equilibrio, provocando un transporte, es directamente proporcional al **potencial impulsor** (diferencia entre las condiciones real y de equilibrio) e inversamente proporcional a la **resistencia** que el sistema opone a dicho transporte (formalismo de ley de Ohm):

$$\phi = \frac{d\Gamma}{dt} = \frac{\Delta \Pi}{R} \qquad [1.7]$$

F.E. Jarabo Friedrich
F.J. García Álvarez
CC BY NC SA

1.9.2 Cinética química

La velocidad con que un sistema reaccionante evoluciona hacia el equilibrio depende de diversos factores, cuya formulación se denomina **ecuación cinética**:

$$r_i = \frac{dN_i}{dt} = f\left(C,\ T,\ \eta\right) \qquad [1.8]$$

F.E Jarabo Friedrich
F.J. García Álvarez
CC BY NC SA