



Pedro Partal López

LA INGENIERÍA DEL PRODUCTO QUÍMICO

UN PARADIGMA DE LA INGENIERÍA QUÍMICA

Lección Inaugural
Curso 2020-2021

LA INGENIERÍA DEL PRODUCTO QUÍMICO

UN PARADIGMA DE LA INGENIERÍA QUÍMICA

PEDRO PARTAL LÓPEZ

CATEDRÁTICO DE INGENIERÍA QUÍMICA

LA INGENIERÍA DEL PRODUCTO QUÍMICO

UN PARADIGMA DE LA INGENIERÍA QUÍMICA

LECCIÓN INAUGURAL
CURSO ACADÉMICO
2020-2021



Universidad
de Huelva



DATOS EDICIÓN

PRIMERA EDICIÓN EN FORMATO EBOOK: SEPTIEMBRE 2020

PRIMERA EDICIÓN EN FORMATO PAPEL: SEPTIEMBRE 2020

© Servicio de Publicaciones
Universidad de Huelva

© Pedro Partal López

I.S.B.N.: 978-84-18280-23-8

El.S.B.N.: 978-84-18280-24-5

Depósito legal: H 163-2020

PAPEL

Papel

Offset industrial ahuesado de 90 g/m²
Impreso en papel de bosque certificado

Encuadernación

Rústica, encolado PUR
Printed in Spain. Impreso en España.

Maquetación

Servicio de Publicaciones Universidad de Huelva

Imagen de cubierta

CCO Dominio Público

Publicaciones de la Univesidad de Huelva es miembro de UNE

Reservados todos los derechos. Ni la totalidad ni parte de este libro puede reproducirse o transmitirse por ningún procedimiento electrónico o mecánico, incluyendo fotocopia, grabación magnética o cualquier almacenamiento de información y sistema de recuperación, sin permiso escrito del editor. La infracción de los derechos mencionados puede ser constitutivo de delito contra la propiedad intelectual.

 [Clique para mayor información](#)



EL EBOOK LE PERMITE



Citar el libro



Navegar por
marcadores e
hipervínculos



Realizar notas
y búsquedas
internas



Volver al
índice
pulsando el pie
de la página



Comparte
#LibrosUHU



Únete y
comenta



Novedades a
golpe de klik



Nuestras
publicaciones en
movimiento



Suscríbete a
nuestras
novedades

ÍNDICE

RESUMEN Y MOTIVACIÓN.....	13
1. HISTORIA DE LA INGENIERÍA QUÍMICA.....	15
2. PARADIGMAS DE LA INGENIERÍA QUÍMICA.....	19
3. LA INGENIERÍA DEL PRODUCTO QUÍMICO	29
3.1. El producto químico	31
3.2. El producto químico formulado o estructurado	34
3.3. Estrategias en ingeniería del producto químico	39
3.3.1. <i>Estrategias basadas en el diseño de</i> <i>productos químicos homogéneos.....</i>	50
3.3.2. <i>Estrategias centradas en la formulación y</i> <i>procesado del producto químico estructurado</i>	54
4. DOCENCIA, INVESTIGACIÓN Y PRÁCTICA INDUSTRIAL DE LA INGENIERÍA DEL PRODUCTO	64
4.1. La docencia en ingeniería del producto	65
4.2. La ingeniería del producto en la industria	70
4.3. Investigación en ingeniería del producto	72
5. LA UNIVERSIDAD DE HUELVA UN CASO PARADIGMÁTICO EN LA INGENIERÍA DEL PRODUCTO QUÍMICO.....	73
6. CONCLUSIONES.....	80
7. BIBLIOGRAFÍA.....	82

*a Maria, Pablo y Fer,
gracias*

Agradecimientos

Sirvan estas breves líneas para expresar mi más profundo agradecimiento a todos mis compañeros y amigos, que me han acompañado en este viaje académico iniciado en el curso 1994-1995. Particularmente, a los profesores de Área de Conocimiento de Ingeniería Química que me acogieron en aquellos inicios, Benjamín Conde y Dolores Ruiz, a los que llegaron al mismo tiempo y se incorporaron en nuestro grupo de investigación, José M^a Franco, Francisco Martínez, Javier Navarro, Concha Valencia y M^a Carmen Sánchez, y a los que vendrían a continuación, como fruto de la docencia e investigación de esta universidad, Inmaculada, Miguel Ángel, Moisés, Quique, Antonio o M^a José. No deseo olvidarme de mis otros compañeros del Departamento, sin su colaboración nuestra disciplina, la Ingeniería Química, no se hubiera hecho adulta en la esta Universidad. Tampoco de Alba por su inestimable ayuda en la elaboración de las figuras que aparecen en esta Lección.

Pero sobre todo no quiero olvidarme de Crispulo Gallegos, que para todos nosotros ha sido un referente académico, un mentor y, por encima todo, un amigo. Su visión docente e investigadora ha sido decisiva en el desarrollo de la Ingeniería Química en la Universidad de Huelva y, particularmente, de la Ingeniería del Producto Químico.

A todos muchas gracias.

RESUMEN Y MOTIVACIÓN

Excma. Rectora Magfca. de la Universidad de Huelva

Excmas. e Ilmas. Autoridades

Queridos Compañeros

Queridos Estudiantes

Señoras y Señores

Quiero empezar expresando mi agradecimiento a todos los que han hecho posible mi presencia hoy en este acto, a la Excma. Rectora Magfca. y a las autoridades de la Universidad de Huelva, al Departamento de Ingeniería Química, Química Física y Ciencias de los Materiales y a la Escuela Técnica Superior de Ingeniería.

Cuando, sin esperarlo, se recibe el encargo de impartir una Lección Inaugural, obviamente, éste siempre llega como un reconocimiento, pero, sobre todo, como una gran responsabilidad derivada de la relevancia de un acto como éste. A partir de ese momento, y en las semanas siguientes, solo se tiene una pregunta en la mente, ¿cuál será el tema de la Lección?, intentando que éste pueda interesar a una audiencia tan amplia e ilustre.

En este caso, tras discutirlo con mis compañeros, la Lección debía estar necesariamente relacionada con los estudios en ingeniería química, y cómo estos se han ido adaptando a los cambios que ha experimentado nuestra sociedad. Y es que la Ingeniería Química ha cumplido 25 años en nuestra universidad, durante los cuales se ha desarrollado una intensa actividad docente y de investigación, que se han retroalimentado y contribui-

do a adaptar la formación de nuestros egresados a los nuevos retos de la industria química.

Para mí, todo empezó cuando me incorporo en el curso 94/95, coincidiendo con el inicio del Título de Ingeniero Químico, que fue la primera Ingeniería superior que se impartió en la Universidad de Huelva.

Mi llegada coincide también con el nacimiento de esta nueva ingeniería dentro del mapa de titulaciones del Sistema Universitario Español de la época. A pesar de la madurez de esta disciplina en el resto del mundo, con más de 100 años de antigüedad, los primeros estudios dirigidos al establecimiento de la profesión de Ingeniero Químico no aparecen en España hasta los años noventa, concretamente en 1992. Hasta entonces, los estudios de ingeniería química se repartían, con mayor o menor extensión, entre las Facultades de Química, a través de su especialización en química industrial, y las Escuelas de Ingenieros Industriales, a través de su especialización en química. Sin embargo, la dinámica propia del país y los contactos e intercambios con el exterior ponen de manifiesto, cada vez con mayor claridad, la conveniencia de orientar estos estudios hacia una titulación común de dos ciclos con una formación básica y especializada más acorde con las necesidades profesionales y en sintonía con el entorno internacional.

En esos primeros años de existencia de la Titulación, también se incorporaron a nuestra universidad un grupo de profesores que pusieron las bases de una nueva investigación, alejada de la Ingeniería Química tradicional que, hasta entonces, se había centrado en el proceso químico. Esta nueva investigación que ponía su foco en el producto químico y su usuario final, concretamente en productos químicos estructurados, que luego definiremos. Sin ser aun conscientes de ello, nos estábamos sumando a una nueva corriente de conocimiento, que ha dado lugar a lo que muchos consideran el tercer paradigma de la Ingeniería Química, la Ingeniería del Producto Químico.

El paradigma de la Ingeniería del Producto nace a finales del siglo XX y es una consecuencia directa del cambio de la industria

química hacia la fabricación y venta de productos de alto valor añadido, comercializados según especificaciones de rendimiento o funcionalidad y no de pureza. En este contexto, los ingenieros químicos deben tener una mentalidad de ingeniería de producto, que les permita resolver problemas en los que tanto el producto como su proceso de fabricación están relacionados, en última instancia, con la percepción del consumidor, una clase de problemas totalmente nuevos y de gran relevancia.

A lo largo de esta Lección conoceremos la historia de la Ingeniería Química, que enlazaremos con sus paradigmas, entendidos como nuevas formas de pensar y de resolver los retos de la industria química, muchos de ellos derivados de los cambios sociales. A continuación, nos adentraremos en la ingeniería del producto y conoceremos algunas de las metodologías propuestas para abordar el diseño e ingeniería de productos químicos de consumo con alto valor añadido. También, analizaremos los estudios en ingeniería del producto que actualmente se imparten en las universidades europeas y americanas, y los requerimientos de la industria en términos de formación de los nuevos ingenieros químicos y sus retos en el desarrollo de nuevos productos y tecnologías. Finalmente, analizaremos cómo ha evolucionado la investigación en ingeniería del producto en la Universidad de Huelva y cómo se ha ido incorporando el estudio de esta disciplina en los programas académicos de esta universidad.

1. HISTORIA DE LA INGENIERÍA QUÍMICA

En sus inicios, el desarrollo de la industria química, que tuvo una posición predominante en el entorno industrial de finales del siglo XIX, se basó en casi un siglo de avances científicos en universidades fundamentalmente alemanas. País donde se dieron, a principios de ese siglo, las condiciones científicas ideales para promover el estudio de la química. Así, deben destacarse las aportaciones carácter investigador y docente de Justus von Liebigde, que en 1825 estableció un pequeño laboratorio de química en la Universidad de Giessen, Alemania. Cuya carac-

terística principal fue el interés por aplicar sus descubrimientos fundamentales al desarrollo de procesos y productos químicos específicos (Peppas, 2016).

Junto a este laboratorio, también en Alemania, debe destacarse la actividad de otros tres grandes laboratorios de química en las universidades de Giessen, Göttingen y Heidelberg, donde en el segundo cuarto del siglo XIX se formaron un número de destacados químicos orgánicos y químicos físicos. En todos ellos se llevaron a cabo investigaciones imaginativas que condujeron a nuevos métodos de producción de importantes productos químicos para la industria alemana de la época. Los estudiantes formados en estos laboratorios a su vez establecerían laboratorios en otros lugares, incluyendo los Estados Unidos. En este contexto, la revolución política iniciada en Francia en 1848 y que se extendió hacia el este, llevando a Europa Central una muestra de reforma liberal, también tuvo como resultado un intento de revisar los procesos químicos industriales, poniendo un mayor énfasis en el empleo de métodos más seguros y eficientes. En estas circunstancias el campo de la ingeniería química surgiría a mediados del siglo XIX (Peppas, 2016).

Sin embargo, a pesar de los avances de las universidades y la industria alemanas, aún no se había formalizado la enseñanza de la ingeniería química. Los estudios solían ser superficiales en lo relativo a los nuevos procesos químicos industriales, generalmente impartidos en cursos de química. Por otra parte, el funcionamiento de los equipos presentes en la industria química como columnas de destilación, filtros u otros similares se enseñaba en las llamadas escuelas técnicas, no en las universidades (Peppas, 2016). Aún la química aplicada significaba un arte, un oficio para obtener sal, jabón, ácido sulfúrico, azúcar, etc. en laboratorios, talleres y fábricas, donde las recetas tradicionales eran modificadas con pequeñas mejoras empíricas obtenidas a partir de la observación. Este período puede considerarse como la *etapa empírica* de la ingeniería química (Woinaroschy, 2016).

Fundamentalmente en el último cuarto del siglo XIX, como consecuencia de aumento de la competencia entre Gran Bretaña, Alemania y los Estados Unidos por los productos químicos, los conocimientos en ingeniería química comienzan a tener una gran demanda. En este período, el desarrollo de una gran variedad y cantidad de sustancias químicas da lugar a una nueva etapa, la *etapa racional* de la ingeniería química. En ella, el empirismo fue abandonado en favor de métodos científicos racionales. En este contexto, en 1885 el Prof. H.E. Amstrong imparte el primer curso de ingeniería química en el Central College of London. En este curso se aborda el diseño de equipos de la industria química combinando formación científica fundamental con la formación técnica práctica. Puede considerarse que en este momento comienza la *etapa racional* de la ingeniería química (Woinaroschy, 2016).

También en Inglaterra, George E. Davis, profesor del Manchester Technical College, decidió trasladar a las aulas los conocimientos adquiridos durante años sobre la inspección de plantas químicas. En 1887 dio una serie de conferencias que más tarde fueron publicadas en el Chemical Trade Journal. De igual forma, en 1888, Lewis M. Norton del departamento de química del Massachusetts Institute of Technology (MIT) ofreció un nuevo curso de ingeniería química. En él, Norton aplicó sus conocimientos sobre la industria química alemana, probablemente la más avanzada del mundo en ese momento (Peppas, 2016).

Se considera que el MIT fue la primera universidad que ha ofrecido, en 1888, un plan de estudios de cuatro años en ingeniería química. El primer programa completo de Ingeniería Química fue creado para salvar la brecha entre la química y la ingeniería industrial del momento. En un entorno con un fuerte crecimiento de nuevos productos químicos y de altos niveles de competencia que estimularon la necesidad de optimizar las operaciones químicas, a través del desarrollo de reactores continuos; mejorar la eficiencia de los equipos de separación y recuperación productos químicos; avanzar en el conocimiento

del transporte de calor, de fluidos y sólidos; etc.. Otras universidades pronto siguieron el ejemplo del MIT, ofertando programas de cuatro años en ingeniería química liderados por departamentos de química.

En 1898, Frank H. Thorpe, graduado del MIT y que había asumido la responsabilidad de curso Norte, publicó lo que puede considerarse el primer libro de texto sobre ingeniería química, titulado *Outlines of Industrial Chemistry*. Este libro de texto ya mencionaba el tratamiento químico de los subproductos biológicos, introduciendo someramente los primeros procesos biotecnológicos (Peppas, 2016).

Casi al mismo tiempo, en Inglaterra, Davis publicó su *Manual de Ingeniería Química Handbook of Chemical Engineering* (1901), que fue revisado y publicado en una segunda edición en 1904. Davis fue, por tanto, el responsable de acuñar el término “ingeniería química” para describir esta nueva ingeniería que abordaba los problemas de la industria química. No menos importante, el libro de Davis introdujo la noción de “operaciones unitarias”, aunque el término en sí mismo no sería acuñado hasta 1915 por Arthur D. Little en el MIT. El término “operaciones unitarias” se refería a la idea de que todos los procesos químicos pueden ser analizados dividiéndolos en distintas operaciones, como la destilación, la extracción, la filtración o la cristalización, todas ellas regidas por ciertos principios (Peppas, 2016).

Las lecciones de Davis recogidas en este libro incluían una gran variedad y abundancia de datos técnicos y económicos. No obstante, debido a la falta de explicaciones científicas este libro pertenece a la etapa empírica de la ingeniería química, pero es un documento que revela la importancia de ésta en esa época. Como resultado de este libro, la ingeniería química desarrolló gradualmente una identidad disciplinaria específica a lo largo del siglo XX, centrándose primero en las operaciones unitarias, y luego añadiendo la termodinámica aplicada, la ingeniería de reacción química, las matemáticas aplicadas y la informática (Peppas, 2016, Woinaroschy, 2016, Valiente-Barderas, 2015).

Fue a mediados de la década de los 70 del siglo XX, cuando los ingenieros químicos comenzaron a involucrarse cada vez más en áreas fuera del núcleo de la ingeniería química clásica, incluyendo áreas interdisciplinarias como las ciencias bioquímicas y biomédicas o la ciencia de materiales (Peppas, 2016). También a finales del siglo XX, la industria química avanzó hacia la fabricación y venta de productos de mayor valor añadido. Este cambio no solo implicó el paso de producir sustancias químicas básicas o "commodities" (amoníaco, ácido sulfúrico, metanol, etileno) a "especialidades" (como polímeros, tensioactivos, pigmentos o sabores). Más aun, supuso un cambio de estrategia, que se aleja de los compuestos químicos vendidos de acuerdo a su pureza, dando más importancia a materiales o productos vendidos por su funcionalidad y capacidad de actuación (Villadson, 1997, Hill 2004). Estos últimos materiales serán denominados en este trabajo "productos químicos" de forma genérica (Cussler y Moggridge, 2001). Como consecuencia de estos cambios, hoy en día, los ingenieros químicos se encuentran involucrados en muchos de los avances científicos y tecnológicos relacionados con la sostenibilidad, nanotecnología, productos químicos microestructurados, etc.

2. PARADIGMAS DE LA INGENIERÍA QUÍMICA

A lo largo de la historia de esta disciplina se han propuesto numerosos paradigmas, como por ejemplo, los balances de materia y energía, analogías de cantidad de movimiento, acoplamiento reacción-transporte, distribución de tiempo de residencia, dispersión axial, tanque de agitado continuo, dinámica no lineal, estructura de la materia condensada, etc. (Villiermaux, 1993; Valiente-Barderas, 2015; Mashelkar, 1995).

Esto ha llevado a un uso excesivo de la palabra paradigma y a cierta confusión sobre el significado del término. De acuerdo con el diccionario de la Real Academia Española de la Lengua, uno de los significados de la palabra paradigma es: "Teoría o conjunto de teorías cuyo núcleo central se acepta sin cuestionar y que

suministra la base y modelo para resolver problemas y avanzar en el conocimiento” y pone como ejemplo “El paradigma newtoniano”. Por su parte, dado que la mayoría de los artículos publicados sobre el tema están escritos en inglés es conveniente conocer la definición de The American Heritage Dictionary of the English Language. Según éste paradigma es: “Un conjunto de suposiciones, conceptos, valores y prácticas que constituye una forma de ver la realidad para la comunidad que los comparte, especialmente en una disciplina intelectual”. Sobre su uso, este diccionario afirma que desde la década de los 60, el termino paradigma también se ha utilizado en la Ciencia para referirse a un marco teórico. Así, en el libro de Kuhn (1996) titulado *The structure of scientific revolutions* (y publicado por primera vez en 1962), se utiliza el término paradigma para indicar una forma específica de ver la realidad científica, la mentalidad de una comunidad científica. En él, Kuhn incluye a la dinámica Newtoniana o la mecánica cuántica, como ejemplos de paradigmas que afectaban a la elección de los problemas que se consideraban dignos de solución, así como a los enfoques aceptables para resolver esos problemas (Hill, 2009).

El paradigma científico en ingeniería química se utiliza ampliamente hoy en día, ampliando su aplicación con la incorporación de las ciencias biológicas o las nuevas herramientas de la tecnología de la información. Sin embargo, por muy importantes que hayan sido estos últimos elementos, se han incorporado al paradigma de la ingeniería química ya existente, en lugar de conducir a una nueva mentalidad (Hill, 2009). Del mismo modo, las técnicas específicas para resolver diversas clases de problemas de ingeniería química, como los balances de materia y energía, no deben considerarse paradigmas nuevos, ya que se inscriben en el modo de pensar actual de la ingeniería química (Woinaroschy, 2016; Hill, 2009).

Desde esta perspectiva, debe tenerse en cuenta que originalmente la ingeniería química no tenía ningún paradigma (Hill, 2009). Como se ha comentado antes, los procesos químicos fue-

ron estudiados en el contexto de diferentes industrias, donde los ingenieros analizaron y mejoraron los procesos para hacer jabón, tintes, azúcar, etc.. En este contexto, sin la mentalidad de un principio unificador, los ingenieros no buscaban y, por lo tanto, no veían lo común entre estos procesos (Wei, 1996). Fue esta mentalidad unificadora, normalmente recogida a un libro de referencia que aunaba y estructuraba los conocimientos existentes al respecto, lo que ha marcado el nacimiento de los paradigmas científicos más aceptados en ingeniería química.

Así, la introducción del concepto de *operaciones unitarias* en 1915 dio a la ingeniería química su *primer paradigma* (Committee on Chemical Engineering Frontiers, 1988; Favre et al., 2002; Wei, 1996). Con mentalidad unificadora, los ingenieros comenzaron a reconocer los puntos comunes en las diversas etapas de un proceso químico, a pesar de su uso en diferentes industrias.

Como ya se ha comentado, el libro de Davis (A Handbook of Chemical Engineering) introduce una novedad, que posteriormente alcanza gran relevancia para el progreso de la ingeniería química. En lugar de describir cada proceso tecnológico existente en ese momento, Davis considera que un proceso químico industrial está compuesto por distintas operaciones que están presentes, en diferentes secuencias y condiciones, en muchos otros procesos. Sin embargo, Davis no enunció explícitamente el concepto de operación unitaria, lo que se le atribuye a Arthur D. Little, que en un informe al MIT introdujo la noción de operaciones unitaria (Woinaroschy, 2016). Se puede suponer que este concepto y su aplicación es el primer paradigma de la ingeniería química. Bajo este primer paradigma, la ingeniería química pasa de estudiar cómo fabricar un producto básico específico a estudiar las operaciones unitarias. Como consecuencia, el diseño de procesos químicos se convirtió en una cuestión de decidir qué secuencia de operaciones unitarias era la más apropiada para la fabricación de un producto (Hill, 2009)

Este primer paradigma apareció como una necesidad de sistematizar el conocimiento relacionado con los detalles del

proceso, derivada del extraordinario desarrollo de la industria química a finales del siglo XIX y principios del XX. Se puede considerar que el libro representativo de este paradigma es “Principles of chemical engineering”, escrito por Walker et al. (1923) (Woinaroschy, 2016). A partir de entonces, numerosos libros y artículos científicos han recogido estudios teóricos y resultados experimentales con el objetivo de sistematizar el estudio de las operaciones unitarias. Para ello, se ha considerado necesario (Woinaroschy, 2016):

- profundizar en los principios teóricos fundamentales, necesarios para la formulación de ecuaciones fenomenológicas;
- la realización de estudios experimentales a escala de laboratorio y planta piloto, para el desarrollo de ecuaciones empíricas que no pueden ser formuladas teóricamente;
- y el desarrollo de métodos que permitan el escalado desde el laboratorio o planta piloto hasta la escala industrial.

Además, para abordar con garantías el diseño y operación de un proceso químico, el paradigma de la operación unitaria utiliza los siguientes principios teóricos generales:

- ecuaciones de conservación de cantidad de movimiento, energía y materia;
- ecuaciones termodinámicas de equilibrio entre fases
- ecuaciones de transporte de cantidad de movimiento, energía y materia
- determinación de condiciones financieras y las ecuaciones correspondientes.

De esta manera, si se definen las propiedades físicas de los materiales y las limitaciones tecnológicas y económicas, es posible obtener una solución cuantitativa para cada proceso químico industrial específico. Posteriormente, el paradigma de las operaciones unitarias fue adoptado por otras industrias de procesos, como la industria alimentaria, cosmética o farmacéutica (Woinaroschy, 2016).

Si bien el paradigma de las operaciones unitarias sigue siendo útil hoy en día, resultó ser inadecuado para resolver algunos tipos importantes de problemas (Hill, 2009). Esta conciencia llevó al nacimiento de la ciencia de la ingeniería química como un *segundo paradigma* a finales de los años cincuenta, los *fenómenos de transporte*, que tiene como manual de referencia el libro de texto titulado *Transport Phenomena* de Bird et al. (1960) (Stewart y Lightfoot, 2002; Comité de Fronteras de la Ingeniería Química, 1988; Favre et al, 2002; Wei, 1996; Hill 2009, Woinaroschy, 2016). La primera edición de *Fenómenos de Transporte* se publicó en 1960, dos años después de haber sido publicada preliminarmente con el título de *Notes on Transport Phenomena*, basado en apuntes preparados para un curso de ingeniería química impartido en la Universidad de Wisconsin-Madison, durante el año académico 1957-1958. La segunda edición se publicó en agosto de 2001, y en 2007 se publicó una segunda edición revisada. En el momento de la publicación de este libro, el campo de los fenómenos de transporte aún no había sido reconocido como un tema de ingeniería distintivo. Los autores consideraron que se debía poner más énfasis en la comprensión de los principios físicos básicos, alejando a la ingeniería química del uso excesivo del empirismo (Woinaroschy, 2016). Este enfoque enseñó a los ingenieros a analizar los problemas pensando fundamentalmente en la Ciencia Química y Física subyacente tras cada proceso, formulando ecuaciones matemáticas para describir los fenómenos, y luego resolviendo esas ecuaciones (Hill, 2009).

El paradigma de los fenómenos de transporte es otro paso hacia la sistematización y síntesis de la ingeniería química, ya que aborda los tres procesos físicos elementales que tienen lugar en cualquier tipo de operación unitaria: transporte de cantidad de movimiento, energía y/o materia. Así pues, las operaciones unitarias pueden considerarse como aplicaciones específicas de estos tres procesos fundamentales. Al igual que la combinación de operaciones unitarias da lugar a tecnologías o procesos, los fenómenos de transporte, solos o combinados, dan lugar a operaciones unitarias.

El paradigma de los fenómenos de transporte extiende el contenido de la ingeniería química a una ciencia fundamental y teórica, estrechamente vinculada con la física, las matemáticas, la mecánica, la termodinámica, el electromagnetismo, etc. El nacimiento del segundo paradigma se debe, por lo tanto, a la necesidad de un conocimiento profundo y científico de los fenómenos que explican lo que sucede en el interior de las operaciones unitarias (Woinaroschy, 2016). Aunque la ingeniería depende en gran medida de la heurística para complementar el conocimiento incompleto, en su último análisis, los fenómenos de transporte pueden resultar muy útiles al proporcionar aproximaciones. Éstas pueden comenzar con estimaciones de orden de magnitud, para pasar luego a aproximaciones más precisas, como las proporcionadas por la teoría de la capa límite (Bird et al., 2002).

De acuerdo con lo visto hasta ahora, el primer y segundo paradigma de la ingeniería química se centran fundamentalmente en los aspectos relacionados con la *ingeniería del proceso*. Una necesidad que surge, a lo largo del siglo XX, relacionada con la aparición de una gran diversidad sustancias químicas, o *commodities*, que dio lugar a una fuerte competencia en el entorno industrial de la química básica. En este contexto, el principal propósito de la ingeniería química era reducir el coste del proceso. Incluso las cuestiones relacionadas con el proceso como la fiabilidad, la pureza del producto, el control de la contaminación, etc., se debían traducir, en última instancia, en costes que deben ser minimizados (Woinaroschy, 2016).

Sin embargo, la demanda se modifica a partir de la crisis de los 70 del siglo pasado, cuando se produjeron una serie de cambios que repercutieron de forma notable en el consumo de todo tipo de productos. El cliente está cada vez menos dispuesto a consumir productos estándar, en este período se pasa de un consumo en masa a un consumo diversificado. Es una etapa caracterizada por un mercado muy fragmentado y variable, donde no todo el mundo quiere consumir el mismo producto. Esto conlleva una reducción en los volúmenes de producción, la constante entra-

da de productos nuevos y la influencia del entorno social en la demanda (por ejemplo, grupos de ecologistas, asociaciones de consumidores, etc.) (Carrasco-Rosa, 2007).

La industria química no es ajena a estos cambios sociales. Los productos químicos son muy variados como, por ejemplo, los aditivos para plásticos, lubricantes, combustibles; productos farmacéuticos formulados; productos domésticos; productos de belleza y cuidado personal; o alimentos procesados. Ya sea el usuario de estos productos un cliente industrial o un consumidor individual, es el rendimiento (prestaciones o calidad) del producto en relación con el criterio del cliente lo que determina su valor, no la composición o la pureza de éste (Hill, 2004). En resumen, la ingeniería química tiene un nuevo objetivo, obtener productos con el mayor valor añadido posible a través de la mejora de sus propiedades, lo cual no es una tarea sencilla. Más allá de un tratamiento matemático para maximizar los beneficios, estos dependerán en gran medida de las propiedades alcanzadas en el producto comercializado, de sus prestaciones o utilidad y de su aceptación por parte del consumidor.

Como resultado, los problemas relacionados con el producto no pueden ser resueltos por los enfoques tradicionales de la ingeniería química. Su solución requiere enfoques adicionales más fundamentales y novedosos. Es por ello que la *ingeniería del producto* comienza a ser reconocida como un *tercer paradigma* de la ingeniería química, como se insinuó por primera vez en 1988 (Committee on Chemical Engineering Frontiers-Aiche, 1988, Woinaroschy, 2016). Se puede suponer que el tercer paradigma se impuso por la necesidad de mejorar el rendimiento técnico y económico de los productos generados en un entorno de mercado fuertemente competitivo. Como consecuencia, pasa a ser más importante la calidad, rendimiento o novedad del producto, y su volumen de ventas, que cuánto y cómo se produce. Para ello, los nuevos productos requerirán combinar el amplio conocimiento de productos químicos ya existentes con una gran cantidad de experimentación científica (Hill, 2004 y 2009).

También, la ingeniería del producto debe aplicar inicialmente la heurística cuando los datos son limitados, para a continuación utilizar cálculos detallados cuando los datos están disponibles, siendo ésta la esencia del tercer paradigma (Woinaroschy, 2016).

Los fundamentos del tercer paradigma fueron recogidos, por primera vez, en el libro de texto de Cussler y Moggridge (2001), que tuvo una segunda edición en 2011. Estos autores propusieron un marco genérico para el diseño de productos químicos, que constaba de cuatro etapas. Las tres primeras están relacionadas propiamente con el diseño del producto y la cuarta con la fabricación de éste (Cussler y Moggridge, 2011). Esta última etapa contiene todas las etapas del diseño del proceso, analizando: el proceso por lotes, frente a un proceso continuo; entradas y salidas; reactores y recirculación; y separaciones e integración de procesos (Woinaroschy, 2016).

Según Hill (2009), en la actualidad, la ingeniería del producto ha evolucionado de un concepto a un paradigma debido a los grandes cambios en la industria química, donde el papel y los méritos del diseño de productos aumentan continuamente. Sin embargo, esto no es un argumento para que el diseño de procesos desaparezca. El diseño de productos y el diseño de procesos deben utilizarse conjuntamente, adaptándose a los cambios en la industria química (Hill, 2004). La ingeniería de procesos puede incluso considerarse como un caso especial de ingeniería del producto. En este contexto, los ingenieros químicos deben tener una mentalidad de ingeniería de productos, que les permita resolver problemas en los que tanto el producto como su proceso de fabricación están relacionados, en última instancia, con la percepción de consumidor, una clase de problemas totalmente nuevos y de gran relevancia (Hill, 2004).

Por supuesto, la actual vigencia del paradigma de la ingeniería del producto no impide que surjan otros paradigmas, ni sustituye a las operaciones unitarias o a la ciencia de la ingeniería química (los fenómenos de transporte) como paradigmas (Hill, 2004). Por ejemplo, el Profesor Woinaroschy (2016) en su artículo

“A paradigm-based evolution of chemical engineering”, realiza una interesante reflexión, que a continuación se resume, y que propone la *ingeniería química sostenible* como un *cuarto paradigma* de la ingeniería química.

Este nuevo paradigma reconoce la limitación de los recursos, la exigencia de equidad inter y transgeneracional en la sociedad humana y la necesidad de preservar los sistemas naturales que sustentan la vida (Narodoslawsky, 2013). En este contexto, la industria química, como gran consumidora de materias primas y energía, y con un fuerte impacto medioambiental, no puede quedar al margen de los requisitos de sostenibilidad, más aún, cuando una de las principales tareas de la ingeniería química durante toda su evolución fue reducir el consumo de materiales y energía (Woinaroschy, 2016).

Como resultado, la introducción del concepto de sostenibilidad ha modificado las prioridades de la ingeniería química. Si antes de la era de la sostenibilidad, la reducción del consumo de materiales y energía se imponía por razones económicas (aumento de la rentabilidad, disminución del coste de los productos). Ahora, el factor medioambiental modifica drásticamente la forma en que se analiza el consumo de materiales y energía, dejando de ser la “cantidad” su único objetivo. Se comienza a pensar también en el origen de la materia prima y de la energía, con el objetivo tanto de preservar los recursos utilizados con frecuencia como de implicar nuevas fuentes, especialmente las que son respetuosas con el medio ambiente (Woinaroschy, 2016).

Por ejemplo, en relación con el uso de nuevas materias se comienza a proponer el uso de recursos renovables en el desarrollo de diversos productos químicos de valor añadido (Yang, 2007; Nuñez et al. 2013; Yuliestyan et al. 2018). En relación con los recursos energéticos, la limitación de los recursos fósiles, y sus consecuencias sobre el cambio climático, aumenta la presión social para que se busquen otras fuentes (Woinaroschy, 2016). Relacionado con ello, un desafío adicional para la ingeniería química será generar, utilizar y almacenar energía de manera sostenible.

El desarrollo sostenible será un gran desafío y fuente de oportunidades para los ingenieros químicos en el siglo actual. Para ello, se debe acometer la elaboración de un marco teórico aplicado a la ingeniería química sostenible. De acuerdo con Woinaroschy (2016), el inicio de los fundamentos teóricos y prácticos, que introducen la sostenibilidad en la ingeniería química, se puede encontrar en los libros de Heinzle et al. (2006) y Klemes (2011).

La necesidad por el uso de fuentes renovables de energía y materiales aumenta cada día, y requerirá una reestructuración generalizada de los procesos industriales. La ingeniería química, con su fuerte orientación sistemática y su función de vincular las ciencias naturales, la ingeniería y la práctica industrial, se encuentra en una envidiable posición para hacer frente a los desafíos del desarrollo sostenible. Será por tanto una disciplina de la ingeniería clave para adaptar la sociedad actual a la sostenibilidad (Narodoslawsky, 2013).

Teniendo en cuenta los diferentes paradigmas propuestos, a modo de resumen, Woinaroschy (2016) establece una relación entre necesidades que han surgido a lo largo de la historia de la industria química y como la ingeniería química se ha adaptado a través de los paradigmas (Figura 1).

Como afirma Woinaroschy (2016), la discusión sobre los paradigmas de la ingeniería química no puede evitar la subjetividad. Se podría discutir si la ingeniería del producto y la sostenibilidad deben considerarse como paradigmas en la ingeniería química, al mismo nivel que las operaciones unitarias o los fenómenos de transporte. Probablemente por su novedad, los paradigmas tercero y cuarto aún no han sido establecidos y/o aceptados universalmente, a pesar de la extensa literatura e investigación elaborada en sus campos. A este respecto, coincido con Woinaroschy (2016) y otros autores (Hill, 2009; Favre et al., 2002; Cussler y Wei, 2003; Uhlemann et al. 2019 y 2020) en que la ingeniería del producto y la sostenibilidad, debido a su relevancia económica y social, terminarán siendo aceptadas como paradigmas por la

mayoría de los actores de involucrados en la ingeniería química. Convencidos de ello, el tercer y cuarto paradigma han determinado la evolución de la investigación y la docencia en ingeniería química en la Universidad de Huelva. Particularmente, la ingeniería del producto ha sido el motor de la actividad de nuestro grupo de investigación en los últimos 25 años.



Figura 1. Necesidades en la evolución de la industria química y su correspondiente paradigma (Woinaroschy, 2016).

3. LA INGENIERÍA DEL PRODUCTO QUÍMICO

La ingeniería química tiene una larga tradición y una metodología probada de diseño de procesos relacionados con la química básica, caracterizados por un elevado volumen y variedad de producción de moléculas, normalmente con un bajo valor añadido. No obstante, hoy en día, son cada vez más numerosas las empresas químicas con interés en el desarrollo de productos con mayor valor añadido como, por ejemplo, los denominados productos químicos especializados o "especialidades" (pequeña

cantidad, producción por lotes, alto valor añadido) o los productos formulados (mezclas complejas destinadas a conferir propiedades específicas de uso final) (Favre et al., 2002).

Estos productos de alto valor añadido se denominarán aquí, de forma genérica, como productos químicos (Cussler y Moggridge, 2001), diferenciándolos de las productos o sustancias químicas producidos por la industria química básica (o commodities). De esta forma los productos químicos, que van a involucrar a la ingeniería del producto, incluyen productos químicos funcionales, semiconductores, pinturas, cosméticos, tintas, productos farmacéuticos, productos de cuidado personal, productos para el hogar y alimentos, entre otros (Favre et al., 2002; Hill, 2004).

Además del diseño y la optimización de los procesos, las industrias de productos especializados y formulados se enfrentan también a retos relacionados con el desarrollo de nuevas tecnologías y con los desafíos de comercialización (tiempo de comercialización, diseño de productos inteligentes, elección o adaptación de plantas genéricas no dedicadas, etc.). Además, en lugar de las operaciones unitarias clásicas que se encuentran en la producción de productos básicos (destilación, absorción, extracción, etc.), la elaboración de productos formulados puede requerir el uso de operaciones más exóticas como la emulsificación, el enfriamiento por pulverización, la extrusión, el recubrimiento o la granulación (Favre et al., 2002). La ingeniería del producto químico debe ser una herramienta que propicie el cambio de la industria química hacia la fabricación y venta de productos de alto valor añadido, comercializados según especificaciones de rendimiento o funcionalidad y no de pureza (Cussler y Wei, 2003; Seider, et al., 2009; Villadson, 1997).

En esta Lección el diseño e ingeniería de los productos (DIP) serán considerados de forma conjunta dentro de la denominación genérica de Ingeniería del Producto. De acuerdo con la European Federation of Chemical Engineering (EFCE), la DIP (o la ingeniería del producto) se ha constituido en una rama de la

disciplina de la ingeniería química general, en la interfase entre los campos de la ingeniería química; la ciencia y tecnología de formulación; y la ciencia e ingeniería de los materiales. La ingeniería del producto tendrá, por tanto, aplicación en numerosas áreas industriales, como la farmacéutica, la biomédica, la de productos alimenticios y piensos, la cosmética, los adhesivos, los revestimientos, los materiales compuestos, etc.

Esta disciplina debe organizarse en torno a cuatro elementos principales según la EFCE:

- una metodología estructurada de diseño e ingeniería de productos que abarca todos los elementos de la cadena de suministro de productos
- diseño molecular e ingeniería de propiedades
- comprensión de las relaciones entre la estructura-molecular/microestructura y las prestaciones del producto
- comprensión de las relaciones entre estructura-molecular/microestructura y procesado

Atendiendo a esta visión, se han organizado los contenidos de este apartado.

3.1 EL PRODUCTO QUÍMICO

Un *producto químico*, en el ámbito de la ingeniería del producto, puede referirse en una sustancia química individual, pero con mayor frecuencia será una mezcla de sustancias químicas con una formulación y, a menudo, una microestructura establecida. Estos productos químicos pueden describirse como *productos formulados* (Favre et al., 2002), en contraste con los productos formados por componentes sólidos o piezas que son ensamblados (como automóviles, ordenadores personales y hornos de microondas), denominados *productos ensamblados* (Hill, 2009). Sin embargo, el término producto químico puede abarcar a una más amplia gama de bienes (Tabla 1).

TABLA 1. EJEMPLO DE PRODUCTOS QUÍMICOS (COSTA ET AL. 2006).

CATEGORÍA DEL PRODUCTO	TIPO DE PRODUCTO	EJEMPLO	ATRIBUTO CLAVE
PRODUCTOS QUÍMICOS ESPECIALIZADOS	Tensioactivo	Lauril sulfato de amonio	Estructura molecular
PRODUCTOS FORMULADOS	Cosméticos	Gel exfoliante	Microestructura
BIOPRODUCTOS-PRODUCTOS DE BASE BIOLÓGICA	Fármacos	Alendronato de sodio	Actividad biológica
DISPOSITIVOS	Equipos biomédicos	Oxigenador de sangre	Materiales y ensamblaje
PRODUCTOS QUÍMICOS VIRTUALES	Programas que simulan procesos químicos	Aspen Plus	Rendimiento computacional
BIENES DE CONSUMO BASADOS EN TECNOLOGÍA	Bienes de consumo para el cuidado de la salud	Pañales	Materiales y ensamblaje

Generalizando y normalizando diversas denominaciones que se han adoptado en la bibliografía (Costa et al. 2006; Favre et al. 2002; Cussler y Moggridge, 2011, Moggridge y Cussler, 2000, Wibowo y Ng, 2002), el producto químico puede agruparse en las seis categorías como se ilustra en la Tabla 1 (Costa et al. 2006):

- A) *Productos químicos especializados*: Los productos químicos especializados son compuestos puros que, a diferencia de las sustancias químicas básicas, se producen en pequeñas cantidades (normalmente menos de 1000 toneladas/año), y se venden sobre la base de un beneficio específico o función.
- B) *Productos formulados*: Los productos formulados (por ejemplo, los cosméticos y alimentos procesados) representan una gran fracción del mercado de productos químicos. Estos productos pueden estar formados por diversos componentes, y son diseñados para cumplir unos requisitos de uso final (Favre et al. 2002). Suelen ser multifuncionales porque cumplen más de una función valorada por el cliente, y producidos con una microestructura de la que deriva su valor (Kind, 1999, Favre et al. 2002, Wibowo y Ng, 2002).
- C) *Bio-conceptos o bio-productos*: en esta categoría se encuentran nuevos biomateriales, medicamentos o los derivados de las tecnologías de ingeniería tisular y metabólica. Todos ellos han cobrado más importancia en las industrias de procesos químicos con el aumento de la preocupación por la salud y el bienestar (Costa et al. 2006).
- D) *Dispositivos*: Son a menudo dispositivos que actúan como pequeñas plantas químicas llevando a cabo una transformación física o química, como los dispositivos electrolíticos utilizados para convertir la sal en desinfectante clorado para piscinas; kits para evaluar la calidad de agua de una piscina; filtros de osmosis utilizados en desalinización de aguas; o dispositivos para almacenamiento de energía solar en casa (ej. agua caliente) (Cussler y Moggridge, 2011).

- E) *Productos químicos virtuales*: En esta categoría se incluyen simuladores de procesos como Aspen Plus o de dinámica de fluidos computacional como Ansys CFD, muy demandados por la industria química.
- F) *Bienes de consumo basados en la tecnología*: Productos como las notas adhesivas (Post-it) son bienes de consumo cuya funcionalidad se basa en una tecnología química/física (un adhesivo reversible) o los pañales, cada vez con mayor capacidad de absorción gracias a los polímeros que contienen. Este tipo de productos son considerados una prometedora extensión de la actividad de la industria de procesos químicos.

3.2 EL PRODUCTO QUÍMICO FORMULADO O ESTRUCTURADO

En el contexto de la ingeniería química, la ingeniería del producto se ha tomado a menudo como sinónimo de la ingeniería de formulación y, sobre todo, se ha asociado a productos multifuncionales cuya estructura (en el intervalo de 0.1-100 μm) está específicamente creada para proporcionar la funcionalidad deseada por los clientes (Favre et al. 2002). Generalmente, las propiedades de uso final de esos productos suelen ser más importantes para el consumidor que su composición química. Estas funciones y propiedades de uso final tienen que construirse y escalarse a partir de nano o microestructuras dentro del equipo de proceso, a fin de satisfacer las demandas del consumidor en la mesoescala del producto (Charpentier y McKenna, 2004).

En la práctica, el desarrollo de estos productos implica, a su vez, el desarrollo de nuevas tecnologías que involucran el manejo de partículas sólidas, medios granulares y fluidos complejos (como geles, espumas, polímeros hidrosolubles, coloides, emulsiones o suspensiones). La mayoría de estos productos son fluidos no newtonianos, en los que Reología (su comportamiento viscoso y viscoelástico) y los fenómenos interfaciales desempeñan un papel fundamental.

Estos productos pueden ser semisólidos, líquidos, gases o sólidos, y pueden fabricarse con una forma determinada o a granel (Tabla 2). Existe una extensa bibliografía sobre ellos donde son denominados como productos estructurados (Charpentier y Trambouze 1998; Wintermantel, 1999; Wesselingh, 2001; Charpentier, 2002; Charpentier y McKenna 2004; Villadsen, 1997; Hill, 2009), productos diseñados (Kind, 1999), sistemas dispersos (Schubert y Behrend 2003), productos químicos de consumo (Wibowo y Ng , 2002) o productos formulados (Costa et al., 2006).

Así, bajo estas denominaciones se consideran a productos producidos por diferentes tipos de industrias, que presentan dos características principales (Favre et al., 2002):

- el papel predominante de las interfaces, dada su estructura dispersa;
- el hecho de que la mayoría de los ingredientes y/o aditivos utilizados tienden a desarrollar propiedades coloidales.

En resumen, los productos formulados se caracterizan por una estructura compleja y discontinua, así como propiedades reológicas específicas. Un ejemplo son los llamados fluidos viscoplásticos, con carácter no newtoniano que tienen un esfuerzo umbral (yield stress), como por ejemplo las pastas cerámicas, alimentos, geles, o lodos de perforación.

Esta complejidad microestructural, la importancia de la funcionalidad, el volumen producción y la dinámica de mercado de estos productos, son factores que pueden dar lugar a aparición de nuevos problemas que deben ser abordados por la ingeniería del producto. Algunos de los cuales, propuestos por Favre et al. (2002), se amplían y detallan a continuación:

- Un gran número de operaciones con productos formulados se realizan por lotes, a diferencia de los procesos de producción continua que se encuentran a menudo en la industria química básica.

TABLA 2. EJEMPLOS DE PRODUCTOS QUÍMICOS DE CONSUMO CON DIFERENTES FORMAS Y SISTEMAS DE DOSIFICACIÓN (WIBOWO Y NG , 2002) .

FORMA FÍSICA	FORMA DEL PRODUCTO/ SISTEMA DE DOSIFICACIÓN	EJEMPLOS			
		COSMÉTICA Y CUIDADO PERSONAL	CUIDADO DE LA SALUD Y PRODUCTOS FARMACÉUTICOS	PRODUCTOS DEL HOGAR Y OFICINA	
SÓLIDA	CON FORMA	Materiales Compuestos	Jabón, pintalabios	Barra inhalante	CD, barra de pegamento
		Cápsulas	-	Cápsulas de aceite de ballena	Papel autocopiativo
		Tabletas	-	Tableta de aspirinas	Bolas de antipollilla
		Espumas sólidas	-	-	Espuma de poliestireno
	AMORFO O A GRANUL	Polvo y granos	Polvos faciales, polvos infantiles, absorbentes de pañales	Hierbas medicinales en polvo	Detergente en polvo
.....					

... \ ...

SEMISÓLIDA	Pastas	Pasta de dientes	Pomada para aliviar el dolor	Silicona, adhesivo metálico
	Crema	Crema facial limpiadora, crema suavizante	Crema farmacéutica	Adhesivo multiusos
LÍQUIDA	Espuma líquida	Espuma de afeitar	-	-
	Soluciones macromoleculares	Champú, enjuague bucal	-	Líquido lavavajillas
	Microemulsiones	Acondicionador, tónico facial	Hidrocortisona, ciclosporina	-
	Emulsiones diluidas y suspensiones	Bronceador, esmalte de uñas	Penicilina	Tinta de escribir, fluido corrector (tipex)
	Soluciones	Perfume	Gotas para los ojos, extracto de ginseng	Productos líquidos de limpieza
GAS	Aerosoles	Laca	Spray para el dolor de garganta	Pintura en aerosol, spray anticongelante

- Aparecen nuevas operaciones unitarias como la granulación, la compresión, la extrusión, la refrigeración por pulverización, el recubrimiento, la emulsificación o la gelificación, entre otras.
- Operaciones unitarias tradicionales como el mezclado, la impulsión o de intercambio de calor suelen involucrar fluidos complejos (es decir, fluidos no newtonianos) o partículas sólidas.
- Las relaciones entre estructura y propiedades, la caracterización de la estructura conseguida, y la obtención controlada de estructuras, se han convertido en retos fundamentales.
- El trinomio formulación-procesado-microestructura debe ser abordado en la ingeniería del producto, para ello será necesaria la adquisición de conocimientos científico-tecnológicos específicos.
- Los sistemas reactivos pueden involucrar a fluidos no newtonianos o la reactividad química debe tenerse en cuenta sólo para situaciones específicas (por ejemplo, la reactividad retardada para los adhesivos bicomponente).

Esto ha dado lugar a la aparición de nuevos temas, que formarían el núcleo de conocimientos científicos que define lo que podría denominarse “la ciencia de la ingeniería del producto” (Favre et al. 2002):

- La reología, especialmente aplicada a los medios desordenados y a las mezclas complejas.
- El transporte a través de las interfaces.
- Estructura y comportamiento de sistemas dispersos, incluyendo emulsiones, suspensiones y espumas.
- Fenómenos de transporte en sistemas multicomponentes.
- Metodologías para investigar de forma integrada desde la micro hasta la macro escala.

Dado el factor multiescala involucrado en el desarrollo de estos productos estructurados, para poder diseñar y controlar la

calidad del producto y llevar a cabo su escalado desde el nivel nano al proceso, los ingenieros químicos se enfrentan a numerosos retos, que requieren la adquisición de conocimientos avanzados (Charpentier y McKenna, 2004; Wintermantel, 1999):

- en fundamentos: relaciones estructura-actividad a nivel molecular; fenómenos interfaciales; fuerzas adhesivas; modelización molecular; equilibrios; cinética; y técnicas de caracterización del producto;
- en diseño de productos: nucleación, estructura interna, estabilización, aditivo;
- en la integración de procesos: herramientas de simulación y diseño;
- en el control de procesos: sensores y modelos dinámicos.

Esta es la razón de que numerosas empresas de procesos que fabrican materiales estructurados (fluidos, sólidos blandos y sólidos) colaboren con socios universitarios en programas multidisciplinarios de investigación y desarrollo sobre (Charpentier y McKenna, 2004):

- formación y manipulación de partículas sólidas;
- emulsificación y homogeneización;
- sólidos blandos, para el control de las propiedades de uso final del producto;
- fabricación de un producto con las cualidades deseadas. Donde también deben considerarse los costes de fabricación y los gastos de investigación y desarrollo (alrededor del 30-35% del coste del producto), ambos igualmente importantes.

3.3 ESTRATEGIAS EN INGENIERÍA DEL PRODUCTO QUÍMICO

Aunque las diferentes categorías de productos químicos antes descritas tienen poco en común, atendiendo a su apariencia, microestructura, función o rendimiento, se pueden encontrar similitudes entre ellas en cuanto a su desarrollo y fabricación. La

ingeniería del producto químico debería ser capaz de proporcionar un marco común de conocimientos, enfoques, metodologías e instrumentos, que pueda ser empleado para analizar, desarrollar y producir toda la gama de productos químicos.

Como ya se ha comentado, las bases de la ingeniería del producto fueron establecidas por primera vez en el libro de Cussler y Moggridge (2001), donde sugirieron que el diseño del producto puede ser estructurado en cuatro pasos (Figura 2). El primero es identificar las necesidades del potencial cliente. El segundo es proponer ideas que potencialmente puedan satisfacer esa necesidad. El tercer paso en este esquema es seleccionar las mejores ideas que se van a desarrollar. Una vez completado este proceso, procedemos al cuarto paso, la fabricación del producto, en el que se incluyen todos los pasos del diseño de procesos químicos.



Figura 2. Esquema de diseño de producto propuesto por Cussler y Moggridge (2001 y 2011).

Cada una de las etapas, propuestas por Cussler y Moggridge, debe abordarse atendiendo a diversas consideraciones, como las recogidas por Cussler y Wei (2003):

- **Paso 1-Necesidades:** el primer paso es identificar la necesidad de un cliente, lo que a su vez implica identificar los clientes deseados. Con frecuencia, estos clientes ya estarán

usando un producto relacionado, uno que se desea reemplazar. Estos clientes incluirán a menudo algunos “usuarios principales” que ya están mejorando el producto para sus propios usos. La identificación de estos usuarios principales y la cooperación con ellos es a menudo clave para el desarrollo del producto. Otro aspecto de la identificación de la necesidad de un producto es la selección de las especificaciones buscadas (especificaciones objetivo). En la identificación de especificaciones es donde la ingeniería tiene un papel primordial en esta etapa del diseño del producto.

- **Paso 2-Ideas.** Para encontrar una idea exitosa para un nuevo producto, primero se deben barajar un gran número de ideas. Los estudios de innovación sugieren que se necesitan diferente número de ideas según el tipo de industria. Por ejemplo, para sustancias o compuestos de química básica (commodities), DuPont sugiere que se necesitan 300 ideas para encontrar una exitosa; para los productos químicos especializados, 3M afirma que se necesitan al menos 20. La generación de estas ideas se logra de manera más eficaz mediante un equipo de diseño, que debe incluir a los ingenieros que han establecido las especificaciones, y que seguirán al nuevo producto durante su desarrollo. En su búsqueda de ideas, este equipo de diseño puede recurrir a muchos recursos, incluyendo clientes, consultores y a la literatura.
- **Paso 3-Selección.** Entre las ideas previamente propuestas se deben seleccionar las dos o tres mejores, este paso es considerado el más difícil. En muchos casos, cerca de la mitad de las ideas de productos resultarán ser redundantes o inviables. Otra cuarta parte de ellas resultarán estar estrechamente interrelacionadas, por ejemplo, algunas pueden ser casos especiales de otras. Se proponen el uso métodos rápidos para filtrar las ideas.
- **Paso 4-Fabricación.** Este cuarto paso de diseño del producto debe contener los mismos pasos de la secuencia de diseño

del proceso. Sin embargo, aunque los pasos sean los mismos, las conclusiones tienden a ser diferentes. El proceso es ahora normalmente por lotes, no continuo. El diagrama de flujo se basa, con frecuencia, en un solo equipo al que se añade una secuencia de “ingredientes”. Muchas de estas adiciones pueden ser reactivos o a menudo algunas adiciones de disolventes, dispersantes o espesantes con actividad física. Las reacciones por lotes raramente implican muchas recirculaciones, pero a menudo requieren un control cuidadoso de la temperatura para asegurar la selectividad. Las separaciones tienden a ser la extracción, la adsorción y la cristalización, más que la destilación. Es importante tener en cuenta que se debe tender a usar equipos existentes, contruidos no para la producción eficiente de un solo producto, sino para la producción flexible de muchos productos. Como resultado, la optimización ahora tiende a centrarse en la programación eficiente, no en la operación eficiente.

Como extensión del planteamiento realizado por Cussler y Moggridge, Woinaroschy (2016) sugiere la distinción entre los pasos de la ingeniería de producto y los de la ingeniería de proceso. Proponiendo ampliar el cuarto paso, que implica la fabricación del producto, de forma que contenga todas las etapas del diseño del proceso (Figura 3). De esta forma, la última etapa contemplaría: la selección del proceso (proceso por lotes frente a un proceso continuo); las entradas y salidas; reactores y recirculaciones; y operaciones de separación e integración de procesos. Con ello, pretendía discriminar entre los términos de ingeniería de «producto» y de «proceso».

Sin embargo, esa distinción carece de sentido cuando el proceso para fabricar un producto químico determina sus propiedades de uso y comportamiento. De acuerdo con esto, Costa et al. (2006) consideran que el marco de conocimiento general, que engloba a los dominios del “diseño y desarrollo de productos químicos” y del “diseño y desarrollo de procesos orientados

a los productos”, se denomina mejor como ingeniería de productos químicos. Según estos autores, “el diseño de productos químicos puede definirse como un procedimiento sistemático o marco de metodologías e instrumentos cuyo objetivo es proporcionar un diseño más eficiente y rápido de productos químicos capaces de satisfacer las demandas del mercado”. Según esto, la ingeniería de productos químicos es toda la ciencia y el arte de crear productos químicos, un concepto mucho más amplio que abarca el diseño de productos químicos y su fabricación. En otras palabras, la ingeniería de productos químicos puede considerarse como el conjunto de conocimientos y la práctica que apoya la tarea concreta de diseñar productos químicos y sus procesos de fabricación (Costa et al., 2006). Como resultado, la metodología desarrollada por Cussler y Moggridge (2001 y 2011), aunque propuesta para el diseño de productos, puede ser extendida a la ingeniería del producto químico, como concepto general planteado en esta Lección.

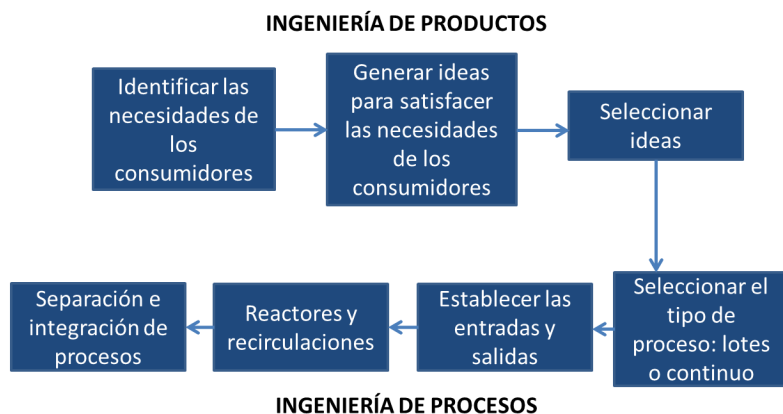


Figura 3. Esquema de la ingeniería del producto y del proceso propuesto por Woinaroschy (2016)

Como alternativa a la metodología secuencial propuesta por Cussler y Moggridge, Costa et al (2006) propusieron otro modelo conceptual para la ingeniería del producto químico, que se resume en la Figura 4. Este modelo estructura la ingeniería del producto químico entorno a tres pilares fundamentales e interrelacionados, que apoyan el objetivo principal de diseñar nuevos productos químicos. Estos pilares son la pirámide de productos químicos; la integración del diseño de productos químicos y procesos; y un enfoque multidisciplinar y multiescala. En el modelo propuesto, los productos químicos se consideran un grupo muy amplio, que abarca una gran variedad de estructuras y funciones.



Figure 4. Estructura para la ingeniería del producto químico (Costa et al., 2006).

Para entender mejor este modelo, Costa et al (2006) describieron lo que implican estos pilares:

(1) la pirámide del producto químico:

La idea de la pirámide del producto químico pretende sistematizar las relaciones entre la composición del producto, las propiedades fisicoquímicas de los materiales, las variables de proceso, los atributos estructurales del producto, las variables de uso y los factores de calidad del producto. De forma gráfica estas relaciones se presentan en la Figura 5, donde la base de la pirámide de tres lados está definida por el "espacio de materiales", el "espacio de procesos" y el "espacio de uso", que soportan el espacio de "productos químicos" que ocupa la parte superior de la pirámide. Las conexiones entre estos espacios y dentro de ellos se establecen mediante "funciones de propiedad", "funciones de proceso" y "funciones de uso". Esta pirámide corresponde al núcleo técnico de la ingeniería de productos químicos, cuyo objetivo principal es el desarrollo de las funciones de propiedad, de proceso y de uso. Estas funciones serán aplicadas, mediante la simulación y la optimización, al diseño y la fabricación de productos químicos con propiedades de uso final valoradas por el cliente.

Lección Inaugural

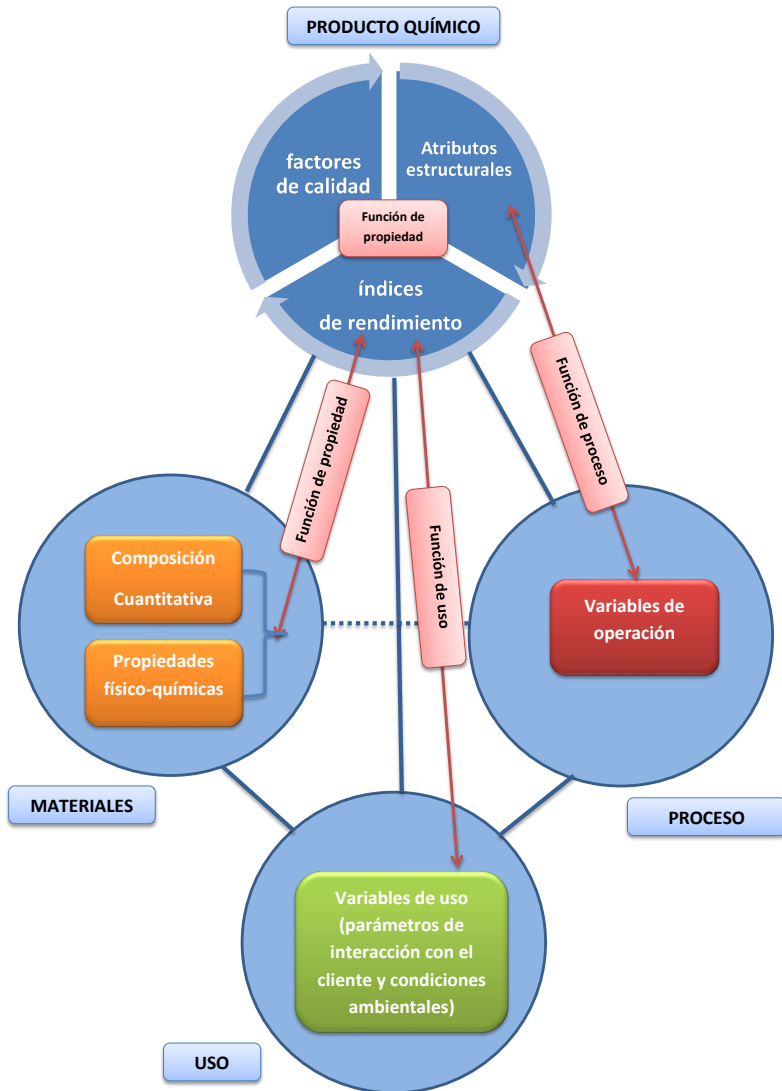


Figura 5. Pirámide del producto químico (Costa et al., 2006)

Sin embargo, el desarrollo y aplicación de dichas funciones no es una tarea sencilla. Particularmente cuando los clientes generalmente no juzgan el valor del producto basándose en especificaciones técnicas cuantificables, sino más bien en la funcionalidad y los atributos de rendimiento subjetivos, como por ejemplo el olor y las propiedades de manipulación. Estos atributos, que se utilizan para expresar y caracterizar la calidad del producto desde la perspectiva del cliente, se suelen denominar factores de calidad. Dado su carácter cualitativo y subjetivo es necesario elaborar parámetros cuantitativos para modelarlos, que se denominan índices de rendimiento.

Los índices de rendimiento están determinados por tres factores principales: la composición y las propiedades fisicoquímicas de los materiales que forman el producto; la estructura del producto, que depende del proceso de fabricación; y las condiciones de utilización del producto. Estos factores se identifican a su vez con las diferentes funciones:

- Función de propiedad. La dependencia entre los índices de rendimiento y la composición del producto, las propiedades de los ingredientes del producto y la estructura del producto (cuando corresponda) se ha sistematizado matemáticamente a través del concepto de función de propiedad, propuesto inicialmente por Rumpf en 1967 (Costa et al. 2006).
- Función de proceso. La estructura deseada del producto requiere la selección de los ingredientes adecuados para éste, pero a menudo la estructura queda también determinada por el proceso de fabricación. La relación entre las condiciones de proceso y los atributos estructurales de un producto químico puede cuantificarse mediante una función de proceso, cuya definición es análoga a la de una función de propiedad.

- **Función de uso.** Las condiciones en que se utiliza un producto químico también afectan a la calidad percibida. Las funciones de uso relacionan los índices de rendimiento del producto con los parámetros de interacción con el cliente y las condiciones ambientales de su utilización. Es decir, se ocupa de los parámetros que describen la forma en que el cliente utiliza el producto (por ejemplo, de parámetros reológicos como la magnitud del esfuerzo cortante involucrada en la aplicación de una determinada crema corporal) y las condiciones ambientales en las que tiene lugar la utilización del producto (por ejemplo, la temperatura, el nivel de humedad y el sustrato sobre el que se aplica una pintura). Estas últimas no pueden controlarse directamente, corresponden a factores de ruido que afectan al rendimiento del producto (Phadke, 1989) y, por lo tanto, exigen robustez al producto (Bernardo et al., 2001).

(2) la integración del diseño de productos químicos y procesos

El diseño de productos químicos y la ingeniería de procesos están estrechamente relacionadas entre sí y deben considerarse desde una perspectiva integrada, en lugar de secuencial. El diseño de productos químicos abarca todo el proceso de conversión de las necesidades de los clientes en productos comercializables y los desarrollos de nuevas tecnologías. Por otra parte, las características de los productos pueden depender en gran medida de su procesado. En consecuencia, tiene sentido adoptar un punto de vista de desarrollo de productos centrado en la integración de la diseño de productos y procesos.

Además, debe considerarse que la rentabilidad de estos productos químicos depende en gran medida de su corta vida útil en el mercado y que el valor de un producto químico suele ser mucho mayor que el de sus materias primas. Todo ello reduce el énfasis en obtener en

un proceso eficiente. El enfoque tradicional por etapas del diseño del proceso (que incluye el diseño conceptual, el diseño básico, el diseño de detalle, la adquisición y la construcción) no resulta adecuado para el diseño de procesos orientados a este tipo de productos químicos. En ellos, la rapidez con que se desarrollan, producen e introducen en el mercado es un factor clave del éxito. Por lo tanto, un enfoque del diseño de procesos que haga hincapié en la velocidad por encima de la optimización parece ser el más adecuado (Costa et al., 2006).

(3) enfoque multidisciplinar y multiescala.

En el contexto del modelo propuesto por Costa et al. (2006), este concepto complementa los de la pirámide de productos químicos y la integración del diseño de productos químicos y procesos (Figura 4). Para Charpentier (2002) la ingeniería de productos químicos puede considerarse a través del triplete ingeniería de procesos-moleculares/producto/proceso. Según este planteamiento, la calidad de un producto químico comercializado a megaescala se define en la nano-microescala de sus compuestos y microestructura, así como en la meso y macroescala de los procesos de fabricación y distribución. Por lo tanto, la ingeniería de productos químicos depende en gran medida de una perspectiva multiescala. Para ello es necesario comprender la relación entre el rendimiento macroscópico y las propiedades microscópicas, y la capacidad de sintetizar problemas en escalas de tiempo y longitud que abarcan muchos órdenes de magnitud. El objetivo último de la ingeniería del producto debería ser la aplicación de las leyes y modelos fenomenológicos (expresados en este modelo por las funciones propiedad, proceso y uso) a la tecnología de productos comerciales (Costa et al., 2006).

Paralelamente a la adopción de un enfoque multiescala, como el propuesto por Costa et al. (2006), la aplicación de la ingeniería del producto químico requiere un enfoque multidisciplinar, con una ampliación de la ingeniería química a temas que tradicionalmente se han estudiado por separado (por ejemplo, la Reología, la tecnología de polvos o la ciencia de los materiales), así como una necesaria colaboración entre los ingenieros químicos, científicos y otros profesionales. Además, para que un nuevo producto químico llegue con éxito a su comercialización, requerirá una mezcla de muchos talentos no relacionados con la ciencia y la tecnología (negocios, bellas artes, etc.). A estos se pueden añadir instrumentos de gestión de la calidad y de ingeniería de la calidad (Costa et al., 2006; Westerberg y Subrahmanian, 2000; Saraiva y Costa, 2004).

Además de estas dos metodologías generales descritas hasta ahora, se han propuesto otros marcos que abordan específicamente el diseño de productos químicos (Cussler y Wei, 2003; Westerberg y Subrahmanian, 2000; Hill, 2009). Todos ellos se asocian principalmente con una visión del proceso de desarrollo que se basa en la demanda del mercado. Los conceptos de diseño de productos químicos y de ingeniería de productos químicos no son considerados como sinónimos, estableciéndose en algunos casos cierta secuencialidad entre ellos, mientras que en otros se destaca la necesidad de integración de ambos conceptos. Esto último es especialmente necesario en el caso de desarrollo de productos químicos estructurados.

3.3.1 Estrategias basadas en el diseño de productos químicos homogéneos

Con una filosofía de secuencialidad, Hill (2009) parte del marco genérico propuesto por Cussler y Moggridge (2001) para el diseño de productos químicos. Considera que los autores plantearon este marco como una simplificación, más interesados en

su aplicabilidad universal que en su eficacia para casos concretos. Esto, a juicio de Hill (2009), lo hace un excelente punto de partida que puede ser extendido. Concretamente, este autor se centra en desarrollar fundamentalmente en los Pasos 2 y 3, es decir, cómo se pueden generar ideas para satisfacer las necesidades de los clientes, y cómo hacer una mejor selección entre esas ideas. Considera que estos pasos deben ocupar una posición central en la metodología de diseño de productos químicos.

De acuerdo con esto, propuso una estrategia para diseñar productos químicos homogéneos cuando se dispone de datos limitados. La metodología tiene los siguientes ocho pasos: (1) definición del producto, (2) requisitos técnicos del producto, (3) relaciones de funcionalidad del producto, (4) generación de candidatos para el producto, (5) selección de candidatos para el producto, (6) diseño del proceso, (7) análisis de riesgo, y (8) análisis financiero (caso de negocio).

La metodología asume que la función buscada del nuevo producto químico ya ha sido identificada, eliminando la necesidad de encuestas de opinión de los clientes (Paso 1). Además, como los productos requeridos son homogéneos, sus propiedades resultarán únicamente de sus componentes, y no de una microestructura del producto generada durante el procesamiento (Hill, 2009). Esto permite diseñar el producto y el proceso de forma secuencial en lugar de simultánea.

Así, el procedimiento sigue en esencia el procedimiento de 4 pasos de Cussler y Moggridge (2001), y añade detalles relevantes adicionales (Hill, 2009):

1. *Definición del producto*: resulta esencial definir ampliamente el producto que será diseñado. Esto consiste en un análisis de las necesidades del cliente y posterior especificación de los objetivos técnicos del producto. Este estudio también analizará los productos ya comercializados, si los hay. Será necesario disponer de la información más amplia posible sobre precios, composiciones, funciones especifi-

cas de sus componentes, puntos fuertes y débiles (tanto desde la perspectiva del cliente/consumidor como del suministrador), costes ocultos y tamaño total del mercado.

2. *Requisitos técnicos del producto:* en esta etapa se deben analizar los mecanismos que permiten al nuevo producto cumplir con su función, y su implicación en las propiedades físicas del producto. Entre estos mecanismos, los fenómenos de la ingeniería química que serán pertinentes para comprender el comportamiento del producto, como la termodinámica, cinética química, fenómenos de transporte, etc.. Cuando haya múltiples propiedades que deban cumplirse simultáneamente, el conjunto completo de propiedades requeridas puede descomponerse en subconjuntos de propiedades que pueden alcanzarse por separado, a través de sus propios componentes. Finalmente, combinando todos los componentes (o subconjuntos) se obtendrá el conjunto completo de propiedades buscado.
3. *Relaciones de funcionalidad del producto:* Para cada subconjunto de propiedades, el conocimiento de los fenómenos de ingeniería química subyacentes (punto 2) debe ser utilizado para obtener ecuaciones que puedan relacionar los comportamientos relevantes del producto con su composición. Estas suposiciones, más o menos simplificadas, deben conducir a modelos útiles para predecir dichos comportamientos relevantes. Estos modelos requerirán identificar parámetros físicos como coeficientes de actividad, calores de fusión, viscosidad o densidad, necesarios para aplicar el modelo con cualquier compuesto candidato. Los parámetros físicos necesarios se obtendrán mediante experimentación o haciendo uso de datos tabulados, correlaciones apropiadas, etc..
4. *Generación de candidatos para el producto:* Para cada subconjunto de propiedades, debe generarse una lista tan amplia como sea posible de compuestos candidatos potenciales. Utilizando los modelos propuestos para las

propiedades de los productos, y cualquier otro factor pertinente, cada lista puede elaborarse eliminando primero los candidatos que no sean apropiados.

5. *Selección de candidatos para el producto:* Para cada subconjunto de propiedades, la funcionalidad o rendimiento global del producto puede definirse asignando un factor de ponderación a cada propiedad incluida en éste. También debe considerarse el coste de los compuestos que cumplen, al mismo tiempo, todos los criterios considerados más relevantes en un subconjunto considerado. A continuación, utilizando los modelos de propiedades y los factores de ponderación, los candidatos con una funcionalidad o rendimiento similar deben ordenarse en función de sus costes. Esto permitirá identificar aquellos compuestos de menor coste (incluidos costes ocultos) que van a permitir formular productos con una funcionalidad similar. Finalmente, suponiendo que el conjunto completo de propiedades requeridas pueda lograrse combinando los componentes de cada subconjunto de propiedades, en esta etapa se podrá recomendar una composición general para ser sometida al estudio experimental.
6. *Diseño del proceso:* Seleccionada una composición preferida, para una capacidad teórica de la planta, se acometerá el diseño preliminar del proceso, incluyendo el diagrama de flujo del proceso, un balance de materia y el dimensionamiento de todo el equipo principal. También se determinará el capital necesario para construir esta planta en función de su capacidad.
7. *Análisis de riesgos:* Se identificarán los principales riesgos técnicos relacionados con el proyecto y se harán recomendaciones para gestionarlos.
8. *Análisis financiero (caso de negocio):* En esta etapa debe decidir si se puede recomendar la inversión, considerando costes, precio de venta recomendado, cuota de mercado, rentabilidad futura, gastos de inversión, etc.

Como se ha visto esta metodología de diseño de productos identificará de forma preliminar un producto que cumpla con la especificación de rendimiento y evaluará tanto la rentabilidad continua como el rendimiento de las inversiones. Sin embargo, como en todo diseño, la metodología propuesta debe ser abordada de manera iterativa (Hill, 2009).

3.3.2 Estrategias centradas en la formulación y procesado del producto químico estructurado

El enfoque propuesto por Hill (2009) ignora los productos estructurados, que alcanzan sus propiedades a través de una microestructura que depende tanto de sus componentes como del proceso de fabricación. Los productos estructurados son ampliamente utilizados en la sociedad moderna, como por ejemplo los alimentos procesados (helados, salsas, mayonesa, etc.), productos domésticos (detergentes líquidos, suavizantes, detergentes sólidos para la ropa) o productos de belleza o de cuidado personal (geles de baño, cremas hidratantes, pasta de dientes). Como ya se ha comentado, la aplicación de la ingeniería del producto en este caso resulta más difícil, ya que el producto y el proceso deben diseñarse simultáneamente (Hill, 2009). Para su diseño, Hill (2009) sugirió dos enfoques preliminares: 1) la generación y reducción sistemática del número de alternativas a través de la heurística, y 2) la optimización del conjunto de todas las alternativas potenciales a través de la programación matemática.

En la práctica, las grandes empresas cuya actividad está orientada a la fabricación de producto químicos estructurados utilizan equipos multidisciplinarios, con funciones bien definidas para el diseño de los productos. A continuación, se describe el procedimiento general que se suele utilizar (Hill, 2004):

1. La necesidad del consumidor se identifica en base a un análisis de las tendencias de los consumidores. Por lo general esta tarea será llevada a cabo por los investigadores de mercado y los comercializadores.

2. La necesidad del consumidor debe traducirse luego en un objetivo técnico, lo que se denomina el "diseño conceptual del producto".
3. El concepto de producto debe trasladarse a un prototipo. Para ello, se debe identificar los "ingredientes activos", preferiblemente novedosos, y que pueden ser biológicos (como agente antienvjecimiento para crema antiarrugas), químicos (un edulcorante para sustituir el azúcar en el helado) o físicos (como un nuevo estructurante o espesante). Dependiendo de la naturaleza del "ingrediente activo", éste puede ser identificado por bioquímicos, químicos orgánicos o los tecnólogos de alimentos. No obstante, la incorporación de un agente activo, y en general la modificación de la formulación no es trivial porque puede afectar también a la estructura del alimento.
4. El "ingrediente activo" identificado debe ser incorporado en un prototipo físico del producto. Se prepara un primer lote del producto a pequeña escala. En este paso normalmente se encuentran involucrados químicos físicos, científicos de materiales, tecnólogos de alimentos e ingenieros químicos.
5. A continuación, el prototipo de producto debe ser evaluado en cuanto a su funcionalidad o rendimiento atendiendo a una serie de criterios pertinentes. Esto se puede hacer con la participación de consumidores reales, pero es común que los prototipos inicialmente se evalúen mediante ensayos de laboratorio para ahorrar tiempo y dinero. La evaluación de los productos es realizada por expertos en análisis y caracterización de productos químicos (químicos analíticos, reólogos, tecnólogos de alimentos, tecnólogos de materiales, clínicos, etc.) y estadísticos.
6. Sobre la base de los resultados obtenidos, el prototipo físico se debe optimizar experimentalmente, guiado por la intuición, la comprensión científica o por ambas. Al igual que en el paso 4, esto lo suelen hacer los químicos físicos,

los científicos de materiales, tecnólogos de alimentos e ingenieros químicos.

Llagado a este punto, es probable que el producto no cumpla simultáneamente todos los criterios de rendimiento que desea el consumidor, o algunos en menor medida. Se pueden hacer rondas adicionales de evaluación y perfeccionamiento de prototipos, que pueden permitir que un producto cumpla simultáneamente todos los criterios de rendimiento en mayor medida. Sin embargo, esto puede ralentizar el lanzamiento del producto, se corre el riesgo de que un competidor comercialice primero un producto similar, reduciendo la posible cuota de mercado y los beneficios. Particularmente, en aquellos productos que tienen una demanda estacional, la necesidad de su comercialización en unas determinadas fechas limita los ciclos de evaluación y perfeccionamiento de los prototipos. Del mismo modo, debe conocerse lo que el consumidor está dispuesto a pagar por un producto, independientemente de sus cualidades. Finalmente, se debe alcanzar un compromiso en cuanto a la funcionalidad del producto deseada, que también tenga en cuenta la velocidad de incorporación al mercado y su coste (Hill, 2004).

La incorporación de un nuevo producto estructurado al mercado es, por tanto, un proceso multidisciplinar complejo, en el que las diversas disciplinas suelen trabajar por separado, reuniéndose periódicamente para comparar notas y mantener a todo el equipo informado de los progresos. Típicamente, los ingenieros químicos no están involucrados en todo el proceso de diseño del producto, sino que se centran en la creación y el perfeccionamiento de los prototipos (Pasos 4 a 6) (Hill, 2004).

Como alternativa a esta metodología que pone el foco en el producto, Wibowo y Ng (2002) propusieron una metodología basada en un procesado centrado en el producto. Un marco sistemático particularmente útil para desarrollar procesos de fabricación de productos químicos de consumo microestructurados.

En este marco el rendimiento del producto, representado por diversos factores de calidad, está relacionado con los ingredientes del producto y sus atributos estructurales, así como con el diagrama de flujo del proceso y las condiciones de operación (Figura 6).

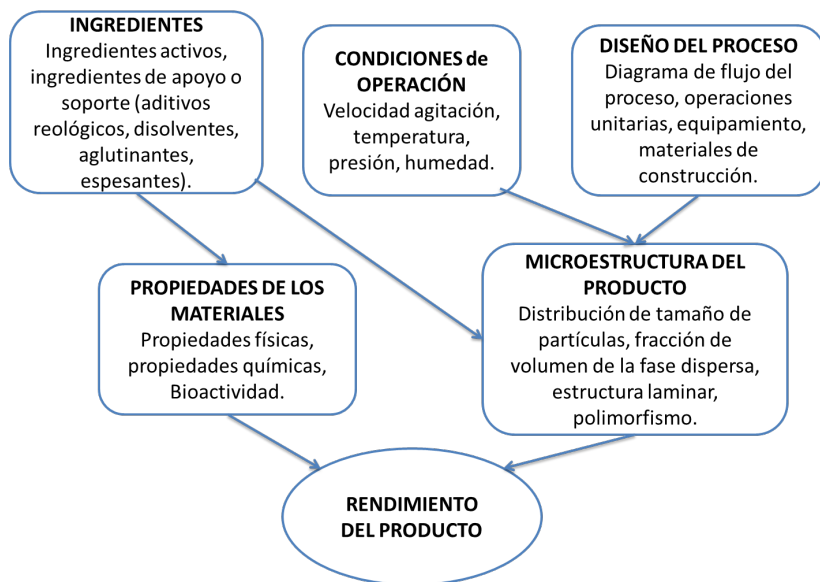


Figura 6. Factores que determinan el comportamiento del producto (Wibowo y Ng, 2002)

El procedimiento propuesto consta de cinco pasos: 1) se define la funcionalidad del producto, la forma y el embalaje; 2) se identifican los factores de calidad pertinentes; 3) se seleccionan los ingredientes necesarios y se determina la microestructura del producto; 4) se diseña el proceso de fabricación a la luz de las propiedades deseadas del producto, y también se identifican la calidad del producto alcanzable; y 5) se evalúan el producto y el

proceso con la ayuda de datos experimentales. A continuación, de forma más detallada, se describen las etapas propuestas y se resumen las consideraciones realizadas por Wibowo y Ng (2002):

Paso 1- Conceptualización del producto.

Consiste en definir el producto mismo. Para ello, es necesario captar las necesidades de los consumidores y las tendencias del mercado. Entre las tendencias típicas se pueden identificar expectativas relacionadas con una mayor duración, menor coste, mayor seguridad y que el producto sea más respetuoso con el medio ambiente. A menudo, el consumidor busca productos que combinen varios ingredientes complementarios, como por ejemplo una legía con detergente o un champú con acondicionador de pelo. En muchos casos, sin embargo, es posible que las tendencias del mercado no se presenten de manera tan obvia.

La conceptualización del producto también implica la selección de la forma apropiada en que se dosificarán (transportarán) los ingredientes clave (ej. en forma líquida, pasta, emulsión, aerosol, en capsulas, etc.). Ello también incluye la selección del envase del producto, que afecta en gran medida a la percepción que el consumidor tiene del producto. Sin embargo, la elección del envase puede imponer limitaciones adicionales al producto, éste debe garantizar que el consumidor lo pueda aplicar de manera sencilla. Por ejemplo, para un producto viscoelástico como la mayonesa, el consumidor puede considerar más higiénico el uso de una botella de plástico con tapa abatible en la parte inferior, pero se debe garantizar que el producto pueda fluir con facilidad por el pequeño agujero de la tapa.

Paso 2-Identificación de los factores de calidad del producto.

El siguiente paso es identificar el rendimiento deseado en términos de factores de calidad. La funcionalidad deseada requiere un conocimiento profundo de las condiciones de aplicación del producto. Pero la capacidad del producto para realizar una

determinada función no será el único factor que influya sobre la satisfacción del consumidor, también estará afectada por la comodidad de uso, la sensación que le produce o la durabilidad del producto. Por ejemplo, los factores de calidad que se suelen esperar de los cosméticos, los productos farmacéuticos y los productos del hogar pueden ser olor, vida útil, facilidad de aplicación, bioactividad, poder de limpieza, etc. Según la forma del producto o medio de dosificación, los factores de calidad deseados pueden ser diferentes. Por ejemplo, la reología es una cuestión importante para las emulsiones, pero no para las píldoras. En algunos casos, el medio o sistema de dosificación no puede conocerse en esta etapa, ya que aún no se han especificado los ingredientes. Por lo que pueden aparecer factores de calidad adicionales en la siguiente etapa.

Muchos de los factores de calidad pueden ser cualitativos. Por ejemplo, los factores de calidad sensorial sólo pueden cuantificarse utilizando una escala arbitraria, mediante un índice que refleje el nivel de satisfacción en el uso de un producto. Este índice se relaciona luego con las propiedades físicas y los atributos estructurales mediante modelos psicofísicos. Sin embargo, hay otros factores de calidad que pueden ser fácilmente cuantificados mediante la medida de propiedades físicas como la resistencia a la tracción, el punto de fusión y la viscosidad. Y otros pueden cuantificarse utilizando números adimensionales.

Paso 3-Selección de los ingredientes y la microestructura del producto.

Una vez definidas las características deseadas del producto, se seleccionan a continuación los ingredientes activos y agentes estructurantes (o de soporte) que proporcionarían dichas características. Estos se seleccionan en función de su capacidad para realizar una determinada función. Pero en su selección también habrán de considerarse los procesos físicos y químicos que puedan tener lugar durante el procesado, almacenamiento y aplicación del producto. La selección de los ingredientes

activos suele comenzar con la búsqueda de posibles candidatos, con la ayuda de técnicas como el diseño molecular y la química combinatoria. El desarrollo de productos multifuncionales suele ser un reto mayor que el de los productos que contienen un solo ingrediente activo, que puede llevar a la necesidad de combinar ingredientes incompatibles en el medio de dosificación. La modificación química de un ingrediente activo puede ser una vía para crear un producto de este tipo. Los aditivos estructurantes pueden elegirse de manera similar. Al mismo tiempo que se seleccionan los ingredientes activos y los agentes estructurantes debe elegirse el método para obtener la microestructura correcta del producto, de manera que ésta pueda realizar la función deseada.

Paso 4-Generación de alternativas de proceso.

Según la composición del producto y el medio de dosificación, el proceso de fabricación de productos de consumo, basados en productos químicos, puede ser una secuencia de operaciones unitarias como las que se muestran en la Figura 7.

De igual forma, en la Figura 8 se representa un diagrama de flujo general del proceso de fabricación de productos de consumo basados en productos químicos. En ella se muestran cinco etapas principales que se pueden dar durante la fabricación: pretratamiento, mezcla, formación de la estructura, postratamiento y empaquetado.

Determinado el esquema del proceso, a continuación, se aborda la selección de los equipos. Por ejemplo, para la etapa de mezclado los equipos deben ser elegidos en base a los ingredientes a mezclar, que suelen ser del tipo tanque agitado. Para la formación de la estructura, la elección viene dictada por el medio de dosificación del producto seleccionado (líquido, emulsión, pasta, etc.). Puede ser necesario utilizar varias operaciones unitarias en serie, cada una formada por diferentes equipos instalados secuencialmente para realizar la tarea en una sola operación unitaria. La siguiente tarea consiste en determinar las

condiciones de operación adecuadas en cada unidad, de manera que se pueda obtener la microestructura de producto deseada. Sin embargo, puede ocurrir que el rendimiento del producto buscado no sea alcanzable, por ejemplo, porque las variables de operación requeridas estén fuera del rango de operatividad del equipo. En ese caso puede ser necesario modificar los ingredientes, la estructura del producto o rediseñar el proceso, de manera que se pueda alcanzar dicho objetivo.

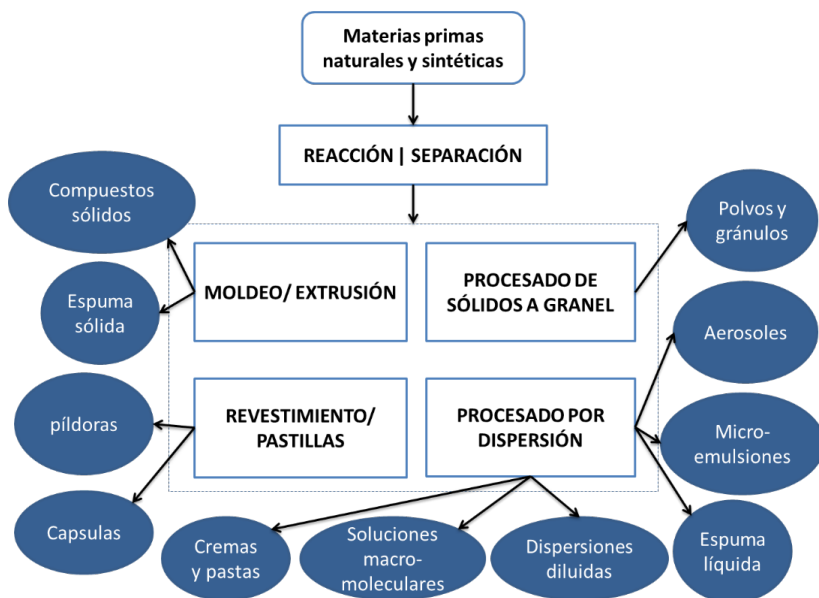


Figura 7. Operaciones unitarias involucradas según el producto (Wibowo y Ng, 2002).

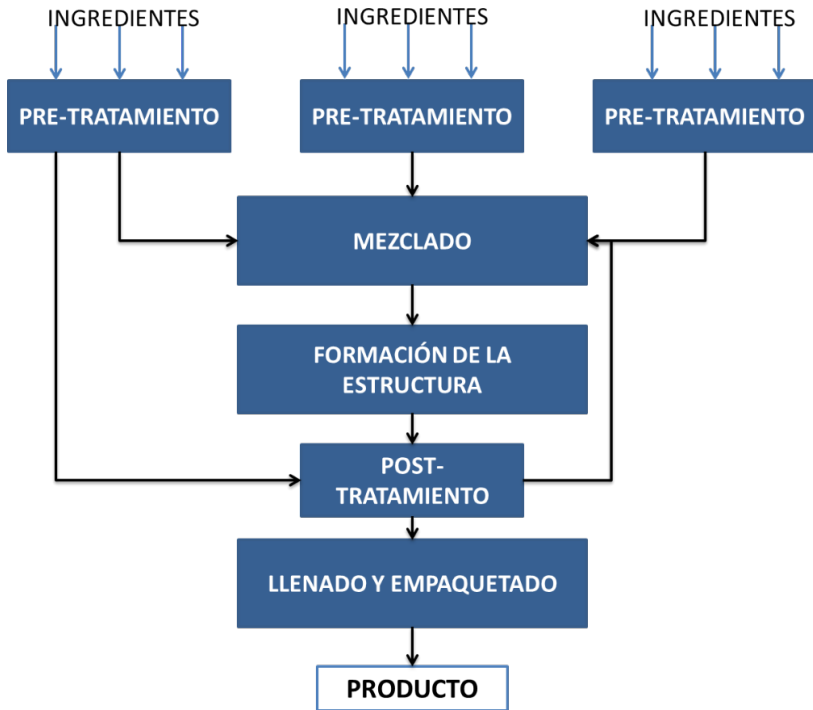


Figura 8. Diagrama de flujo general del proceso de fabricación de productos de consumo basados en productos químicos (Wibowo y Ng, 2002).

Paso 5-Evaluación de productos y procesos.

El procedimiento seguido dará como resultado un prototipo de producto y un diseño inicial del proceso. Sin embargo, estos habrán sido propuestos en base a resultados preliminares, en su mayoría teóricos, que deben ser evaluados y probados utilizando equipos a escala de laboratorio. Ello permitirá identificar desviaciones de los factores de calidad especificados en el paso 2, y determinar las modificaciones necesarias para cumplir los objetivos. Dado que el procedimiento suele dar lugar a múlti-

ples alternativas, es necesario compararlas utilizando criterios como la economía, la seguridad, el impacto ambiental, etc. En este punto, las técnicas de optimización pueden complementar el procedimiento, como herramientas para examinar las alternativas y determinar el proceso óptimo. Llegado a este punto se habrá alcanzado un mayor conocimiento del proceso, que será utilizado para realizar un escalado más fiable. Sin embargo, la complejidad subyacente en estos productos, normalmente, no permite hacer estimaciones precisas basadas únicamente en la teoría, por lo que casi siempre es necesario realizar pruebas en plantas piloto. Incluso será necesario, en el caso de algunas unidades de equipo, realizar pruebas a escala real, utilizando un equipo comercial cedido por el suministrador.

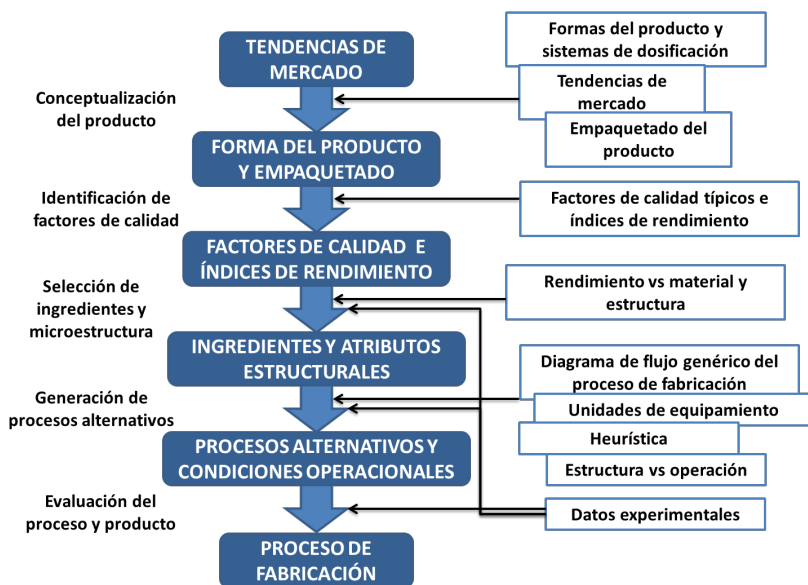


Figura 9. Procedimiento sistemático para la síntesis de un proceso orientado al producto y el desarrollo de un producto químico orientado al consumidor (Wibowo y Ng, 2002).

En resumen, a fin de reducir al mínimo los costes de investigación, desarrollo y fabricación, y reducir el tiempo de llegada del producto al mercado, es conveniente llevar a cabo el desarrollo de procesos y productos de manera eficaz y eficiente. Analizando los diferentes aspectos involucrados en el diseño de productos y proceso a diferentes escalas, e integrarlos de manera sistemática (Wibowo y Ng, 2002). Este procedimiento se resume en la Figura 9.

Una última cuestión importante a tener en cuenta durante el desarrollo de un proceso químico centrado en el producto es la gestión de la información. La disponibilidad de bases de datos e instrumentos informáticos, así como de procedimientos jerárquicos, asisten en gran medida al mismo. La integración de esos instrumentos en un entorno coherente mejoraría aún más el proceso de desarrollo (Wibowo y Ng, 2002).

4. DOCENCIA, INVESTIGACIÓN Y PRÁCTICA INDUSTRIAL DE LA INGENIERÍA DEL PRODUCTO

El cambio de los procesos químicos a los productos químicos implica un lógico cambio en el enfoque de la investigación y la enseñanza de la ingeniería química. En cierto modo, este cambio es un eco de la discusión a mediados del siglo pasado sobre si “ciencia e ingeniería química” era un oxímoron (Cussler y Wei, 2003). Entonces, la ciencia de la ingeniería química fue la consecuencia de un enfoque centrado en los procesos de la química básica. Ahora, al volver al objetivo más amplio de los productos químicos orientados hacia el consumo, nace la necesidad de una base científica más amplia. Para Uhlemann et al. (2020), es el campo de la ingeniería del producto químico (del diseño y la ingeniería de productos) el que ha de ocuparse de la definición de productos nuevos y/o mejorados, basados en las necesidades de los clientes y/o en la contribución de las nuevas tecnologías.

El cambio hacia esta nueva y más amplia ingeniería debe ser evolutivo, no revolucionario (Cussler y Wei, 2003). Esto queda evidenciado por las principales conclusiones extraídas de la en-

cuesta liderada por Grupo de Diseño e Ingeniería del Producto de la European Federation of Chemical Engineering (EFCE). En esta encuesta participaron universidades, expertos y profesionales de la industria química involucrados en esta temática. Los resultados de este estudio, junto a una extensa revisión bibliográfica, permitió a Uhlemann et al. (2019 y 2020) elaborar un interesante documento que discute el estado de la docencia y la investigación de la ingeniería del producto. También, compara las visiones académicas con los requisitos de la industria y, finalmente, analiza las necesidades no satisfechas y las perspectivas para la fabricación del producto químico en el marco de la Industria 4.0. Las conclusiones más relevantes de estos artículos han servido de base para la elaboración de este apartado.

4.1 LA DOCENCIA EN INGENIERÍA DEL PRODUCTO

Como ya se ha visto, los ingenieros químicos no son los únicos involucrados en crear y refinar prototipos de productos químicos, pero sí pueden proporcionar un significativo valor añadido a este proceso de creación. Como profesionales tradicionalmente involucrados en los procesos químicos, exhiben habilidades genéricas como ser buenos solucionadores de problemas, pragmáticos, tienen la habilidad de hacer análisis matemáticos rigurosos, y están entrenados en el pensamiento sistemático. Sin embargo, resultan más interesantes sus habilidades específicas que incluyen un conocimiento práctico de la termodinámica, del flujo de fluidos, de la transferencia de calor, la transferencia de masa y la economía aplicada (Churchill, 2004). Todo ello es especialmente valorado en el diseño de productos químicos estructurados, donde las habilidades técnicas tradicionales de la ingeniería química ocupan una posición preferente (Hill, 2004).

Sin embargo, en opinión de Uhlemann et al (2020) es necesario seguir insistiendo en el papel de la ingeniería del producto como uno de los elementos básicos de la enseñanza, la investigación y la práctica de la ingeniería química. Para estos autores, hay cuatro factores que deben impulsar el desarrollo del diseño

y la ingeniería del producto en los entornos personas/actividad e industria/universidad:

- La industria necesita herramientas para gestionar las complejas cadenas de suministro, los mercados, la gestión del ciclo de vida, la creación de marcas y las tecnologías de apoyo.
- Esto, a su vez, significa que los profesionales involucrados deban hacer frente a funciones complejas en equipos globalizados y multifuncionales, lo que demandará de ellos un permanente aprendizaje a lo largo de toda la vida y una educación continua.
- La Universidad debe preparar a los estudiantes para estos nuevos perfiles de trabajo de ingeniería química, que son cada vez más multidisciplinarios y que requieren desde un profundo desarrollo de competencias sociales hasta extensos conocimientos en materiales avanzados.
- La investigación académica debe aprovechar las nuevas oportunidades que resultan de la modelización a múltiples escalas, la creciente integración con la ciencia y la ingeniería de materiales, así como las nuevas necesidades relacionadas con los productos estructurados y los nuevos paradigmas de fabricación.

En este contexto, se considera que el establecimiento de la ingeniería del producto como una universalidad de la ingeniería química puede hacer más fácil la transición de esta disciplina a la economía del conocimiento, en la que el crecimiento depende de la cantidad, la calidad y la accesibilidad, más que de los medios de producción (Unger, 2019; Uhlemann et al., 2020).

Sin embargo, la incorporación de la docencia de la ingeniería del producto químico en el contexto de los estudios de Ingeniería química tiene aún numerosos retos que deben ser abordados (Uhlemann et al., 2020):

- La necesidad de introducir en la ingeniería química una visión menos analítica
- Ausencia de un marco ampliamente aceptado, equivalente al disponible para el diseño de procesos y la enseñanza de la ingeniería
- Encontrar/desarrollar ejemplos para ilustrar conceptos y hacer que los estudiantes se involucren en los cálculos/análisis de ingeniería de productos
- Generar adecuados proyectos abiertos de diseño de productos
- Encontrar/desarrollar ejemplos relacionados con los productos químicos en las asignaturas de ingeniería química tradicionales para ilustrar conceptos
- Cobertura insuficiente de la ciencia y la tecnología relacionadas con los productos químicos en el programa básico de ingeniería química
- Enseñar el diseño de productos junto al diseño de procesos tradicional

Se une a estos retos, que el diseño y la ingeniería del producto es un campo muy interdisciplinario, con gran énfasis en una amplia gama de temas de ciencia y tecnología, y que también requiere la participación en la esfera empresarial (Uhlemann et al., 2020).

En este contexto, el estudio pone de manifiesto que la enseñanza de la ingeniería del producto aún tiene una limitada presencia en los programas de ingeniería química. A pesar de que se aprecia su valor, esta presencia limitada se suele relacionar con que es una temática difícil de enseñar. No obstante, al igual que la Universidad de Huelva, hace algunos años que prestigiosas universidades de todo el mundo (MIT, Universidad de Cambridge, ENSIC Nancy/Université de Lorraine, Universidad de Groningen, etc.) apostaron por incorporar los estudios de la ingeniería del producto en sus programas de ingeniería química. La forma de hacerlo varía según la universidad, como se puso de

manifiesto en la encuesta realizada por la EFCE a 16 universidades donde se imparte esta disciplina. La encuesta mostró que los cambios curriculares realizados para incorporar el diseño y la ingeniería del producto se llevaron a cabo por diversas vías complementarias (Uhlemann et al., 2020):

- En el 78% de las universidades, enseñando un curso de diseño de productos independiente
- En el 28%, enseñando diseño de productos como parte del curso de diseño de procesos
- En el 67%, diversificando los planes de estudios para incluir más ciencia y tecnología relacionadas con los productos:
 - Biotecnología
 - Reología
 - Procesado de partículas
 - Ingeniería electroquímica
 - Tecnologías de formulación
 - Ciencias de los materiales
- En el 72%, incorporando ejemplos relacionados con estos productos en los cursos básicos tradicionales:
 - Mecánica de los fluidos
 - Fenómenos de transporte
 - Termodinámica
 - Química física
 - Química orgánica
 - Ingeniería de la reacción
 - Operaciones unitarias
 - Dinámica y control del proceso
 - Diseño del proceso
- En el 50%, aumentando la formación en gestión de la innovación, investigación de mercado, desarrollo de nuevos productos y productos industriales.

Sin embargo, a pesar de estos cambios, los autores del informe ponen de manifiesto que las universidades consideran que

estos temas siguen estando deficientemente representados en los programas, ya que se imparten en cursos dedicados pero breves, a menudo optativos, o como contenidos implícitos en módulos más genéricos (por ejemplo, gestión de operaciones, espíritu empresarial). En general, los cambios de planes de estudios aplicados en el conjunto de universidades encuestadas se describieron como modificaciones de escasa o mediana importancia (Uhlemann et al., 2020).

Sin embargo, en algunos casos, se produjo un cambio más profundo en los programas, alineado con la ingeniería del producto, que culminó en vías de especialización ofrecidas como parte de su oferta de cursos de ingeniería química. Este modelo se ha seguido, por ejemplo, en la Universidad de Groningen, donde se ofrece un Máster en tecnología de productos químicos. Al igual que en la Universidad de Huelva que, junto a la Universidad Internacional de Andalucía, en 2006 ofertó en España el primer Máster específicamente orientado a la formulación y tecnología del producto químico estructurado.

Otras universidades que han implementado programas relacionados específicamente con la Ingeniería del producto, o como intensificaciones del Master de Ingeniería Química son:

- University of Birmingham (Reino Unido). M.Sc. Advanced Chemical Engineering. Programa de máster orientado al diseño de productos microestructurados, con intensificaciones en desarrollo de "productos alimentarios" y "productos farmacéuticos".
- Katholieke Universiteit Leuven (KUL) (Bélgica). Master of Chemical Engineering (Leuven). Con intensificaciones en "Ingeniería del Producto", "Ingeniería de Procesos Químicos y Bioquímicos" e "Ingeniería Ambiental"
- Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg (Alemania). M.Sc. Chemical and Bioengineering. Con intensificación en "Tecnología de Procesos y Diseño de Productos".

4.2 LA INGENIERÍA DEL PRODUCTO EN LA INDUSTRIA

Paralelamente, el papel de la ingeniería del producto químico en el sector industrial fue también analizado por la EFCE. Los encuestados de la industria (hasta a 250 empleados) procedían de ocho grandes empresas con actividad en diversos sectores (alimentos, productos de consumo para el hogar y de cuidado personal, productos farmacéuticos y biomédicos, agroquímicos, materiales electrónicos, equipos de procesamiento, etc.). Los encuestados de la industria proporcionaron información sobre los flujos de trabajo de sus empresas en materia de desarrollo de nuevos productos y sobre las necesidades no satisfechas por la ingeniería del producto, relacionadas tanto con sus profesionales como con el conjunto de conocimientos (Uhlemann et al., 2020).

El objetivo era evidenciar los desafíos de la enseñanza del diseño e ingeniería del producto y conocer en qué grado coinciden la visión académica y la de la industria. A modo de resumen la Figura 10 compara las valoraciones académicas y de la industria sobre la pertinencia de determinados contenidos del plan de estudios, en relación con el diseño e ingeniería del producto. Todas las asignaturas del plan de estudios de ingeniería química, representadas en el mapa de posicionamiento de la Figura 10, fueron calificadas como altamente relevantes para la ingeniería del producto por al menos el 50% de los encuestados, tanto universitarios como profesionales de la industria (Uhlemann et al., 2019).

Para la industria las operaciones unitarias, el diseño de procesos y las habilidades relacionadas con la tecnología de la información (TI)/modelización se destacan en el cuadrante superior del mapa. Sin embargo, para la universidad estos temas podrían estar sólo marginalmente integrados en la enseñanza de la ingeniería del producto químico. La alta valoración concedida por los profesionales de la industria se basa en la opinión de que, aunque los ingenieros químicos que trabajen en estos productos pueden tener menos oportunidades de aplicar directamente las operaciones unitarias tradicionales y el diseño de los proce-

sos, se considera que el marco de pensamiento que adquirieron al estudiar estos temas es una ventaja cuando participan en el desarrollo de nuevos productos (Uhlemann et al., 2020). Finalmente, el estudio destaca el interés común de la universidad y la industria por la formación académica en temas como la química física, la Reología, el procesado de partículas, las tecnologías de formulación, ciencias de materiales o la gestión de proyectos (Figura 10).

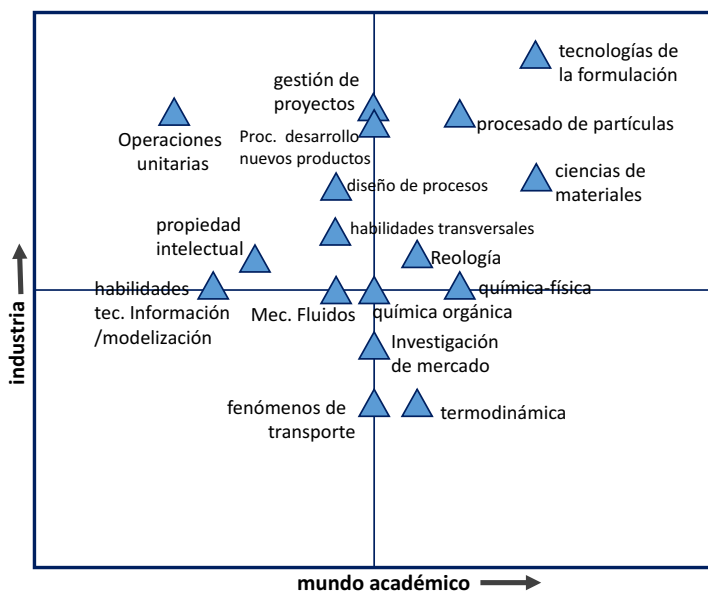


Figura 10. Mapa de posicionamiento que compara las opiniones académicas y de la industria sobre la relevancia de los elementos seleccionados del plan de estudios de ingeniería química, en relación con el diseño e ingeniería del producto, tal como se ha dilucidado en la encuesta de la EFCE (Uhlemann et al., 2010).

4.3 INVESTIGACIÓN EN INGENIERÍA DEL PRODUCTO

La futura práctica industrial de la ingeniería del producto se espera que siga impulsada por los mismos factores expuestos hasta ahora y, además, por las tendencias hacia la personalización (productos relacionados con los servicios), la digitalización (todo lo que pueda ser digitalizado se digitalizará), la sostenibilidad y la transparencia (necesidad social de información transparente) (Uhlemann et al., 2019). En cualquier caso, los productos químicos cuyo valor depende de la funcionalidad seguirán ganando importancia. Por tanto, es esperable que se siga realizando un importante esfuerzo de investigación industrial orientado a mejorar el conocimiento sobre la nano y microestructura de los productos, desarrollo de dispositivos electrónicos de tamaño nanométrico o de sensores y biosensores para hacer mediciones en tiempo real, por ejemplo (Cussler y Wei, 2003).

Para Uhlemann et al. (2019), la ingeniería del producto es la contribución de la ingeniería química al desarrollo de nuevos productos en industrias de procesos que abordan importantes desafíos y buscan soluciones a través investigación. Ejemplos de ellos son:

- la optimización de la biodisponibilidad;
- la ciencia de los materiales farmacéuticos,
- nuevos enfoques terapéuticos como las terapias génicas y celulares para la industria de las ciencias de la vida,
- los nanocompuestos o los revestimientos de altas prestaciones para la industria de los materiales,
- la microestructura de los alimentos de diseño y la liberación controlada de los ingredientes de los alimentos para la industria de los alimentos/piensos o de perfumes concebidos para FMCG (fast moving consumer goods), artículos de gran consumo que son utilizados de forma regular (productos farmacéuticos sin receta, cosméticos o productos del hogar).

Por otra parte, la investigación en la ingeniería del producto no debe olvidar su carácter multidisciplinar y multiescala (Uhlemann et al., 2020). Este enfoque, sugerido por primera vez en la ingeniería química por Villermaux (1993), permite la visión integrada del producto desde la propiedad de uso final hasta su producción en planta.

En este contexto, resulta novedoso el enfoque multiescalar y de diseño de productos asistido por ordenador, aplicado a una amplia gama de productos complejos (Uhlemann et al., 2019). En él, la ingeniería química moderna, aplicada al diseño de productos, aborda de forma integrada la multiescala de los fenómenos físicos y químicos involucrados, desde la escala del producto (molecular, micro) hasta la escala del proceso (meso, macro) (Uhlemann et al., 2019). Esta metodología requiere de la modelización y la simulación a diferentes escalas para predecir cómo los fenómenos a una escala menor se relacionan con las propiedades y el comportamiento a una escala mayor, dentro del diseño y la ingeniería del producto (Lee, 2019). La integración de los métodos de modelización y simulación en el enfoque multiescala puede realizarse sobre la base de tres métodos de modelización y simulación ya existentes: la *química computacional*, la *dinámica de fluidos computacional* (CFD) y la *simulación de procesos* (Jaworski y Zakrzewska, 2011). Como resultado de ello, desde principios del XXI la modelización y simulación se han convertido en herramientas fundamentales para Ingeniería del producto químico.

5. LA UNIVERSIDAD DE HUELVA UN CASO PARADIGMÁTICO EN LA INGENIERÍA DEL PRODUCTO QUÍMICO

La profesión de Ingeniero Químico se encuentra ampliamente reconocida y valorada por la industria química de todo el mundo. Nació hace más de un siglo, cuando el Instituto Americano de Ingenieros Químicos (American Institute of Chemical Engineers, AIChE) fue establecido por un comité de químicos e ingenieros en 1908 (Peppas, 2016).

La creación de AIChE en 1908 dio forma a los sueños de los “químicos convertidos” que se llamaban a sí mismos ingenieros químicos ante la oposición de los empleadores y de los colegas profesionales. En la actualidad, AIChE es una de las principales organizaciones mundiales de ingenieros químicos, con más de 40.000 miembros en más de 90 países. Ahora, a principios del siglo XXI, las contribuciones de los ingenieros químicos siguen siendo fundamentales no sólo para la economía mundial, sino también para la vida moderna (Peppas, 2016).

En Europa, el reconocimiento de la profesión comenzó también a principios del siglo XX. La Institución de Ingenieros Químicos (Institution of Chemical Engineers, IChemE) fue fundada en 1922 en Inglaterra, en la actualidad es una institución multinacional con oficinas principales en el Reino Unido y Australia, con más de 35000 miembros en más de 100 países.

A pesar de la madurez de esta disciplina en el resto del mundo, los primeros estudios dirigidos al establecimiento de la profesión de Ingeniero Químico en España no aparecen hasta finales del siglo XX. Hasta entonces, los estudios de ingeniería química se repartían, más o menos desarrollados, entre las Facultades de Química, a través de su especialización en química industrial, y las Escuelas de Ingenieros Industriales, a través de su especialización en química. Sin embargo, la dinámica propia del país y los contactos e intercambios con el exterior ponen de manifiesto, cada vez con mayor claridad, la conveniencia de orientar estos estudios hacia una titulación común de dos ciclos con una formación básica y especializada más acorde con las necesidades profesionales y en sintonía con el entorno internacional. Así, el reconocimiento del Título de Ingeniero Químico se produce con el Real Decreto 923/1992, de 17 de julio (B.O.E. de 27/8/92), que establece las directrices propias de los planes de estudios conducentes a la obtención de este Título.

La implantación de los estudios de ingeniería química en la Universidad de Huelva sucede en el curso académico 1994/95, coincidiendo con los inicios de la propia universidad. Es por tan-

to una de las primeras universidades españolas que imparte el Título de Ingeniero Químico. La sede fue la entonces denominada Escuela Politécnica en el Campus de La Rábida, en la que venían impartándose titulaciones dependientes de la Universidad de Sevilla. Con la implantación de los estudios de ingeniería química, sucede además la recalificación de dicha Escuela Politécnica que pasa a denominarse Escuela Politécnica Superior con los estudios de ingeniería química como los únicos de rango superior en el Centro. La titulación coexiste con la de Ingeniería Técnica Industrial, especialidad en Química Industrial, hasta la reforma de los estudios universitarios y adaptación al Espacio Europeo de Educación Superior. Actualmente, permanece la titulación de Grado en Ingeniería Química Industrial y el Máster en Ingeniería Química.

La Universidad de Huelva fue también pionera en España introduciendo la docencia en ingeniería del producto, lo que se hizo a través de los estudios de Posgrado. Así, el Programa de Posgrado en "Ingeniería de Fluidos Complejos" recibió la Mención de Calidad, por parte de ANECA, de forma consecutiva entre cursos 03/04 y 05/06. A nivel de Máster, los estudios en ingeniería del producto se establecen en el curso académico 2006/2007 al iniciarse la estructura de Programas oficiales de Postrado que incluían Máster y Doctorado. Concretamente, con el Máster en "Formulación y Tecnología del Producto-Aplicaciones en la Industria Química, Agroalimentaria y Farmacéutica", se inicia dentro del Programa de Posgrado "Procesos y Productos Químicos" que recibió la Mención de Calidad otorgada por ANECA desde el curso 06/07 hasta el curso 11/12. Paralelamente, entre 2008 y 2014, se imparte el primer Máster Erasmus Mundus de la Universidad de Huelva, denominado "European Master in Engineering Rheology-EURHEO", en el que participaban otras 5 universidades europeas y donde una parte importante de su temática estaba basada en la ingeniería del producto (polímeros, sistemas dispersos, medios granulados, etc.).

En la actualidad los estudios de ingeniería de producto se imparten en dos intensificaciones del Máster en Ingeniería Química: ingeniería de productos derivado de la industria petroquímica; e ingeniería de productos agroalimentarios y farmacéuticos. Actualmente, este Máster da acceso al único Programa de Doctorado que incluye todos los ámbitos científicos y técnicos de la Universidad de Huelva, denominado "Ciencia y Tecnología Industrial y Ambiental". Este Programa de Doctorado cuenta con 9 líneas de investigación, una de cuales es la línea de "Ingeniería de Procesos y Productos Químicos" que concentra la mayor parte de las Tesis Doctorales relacionadas con la ingeniería del producto.

Sin embargo, la implantación de los estudios sobre la ingeniería del producto en esta universidad fue precedida por la investigación desarrollada por los profesores del Área de Ingeniería Química, que se inició al mismo tiempo que se implanta la titulación en 1994. La aplicación de los conocimientos adquiridos a través esa investigación acabó contribuyendo decisivamente al avance de la docencia impartida en Ingeniería Química, modernizándola y adaptándola a la demanda futura de profesionales y a una nueva tendencia en esta disciplina, en definitiva, al paradigma de la ingeniería del producto.

Concretamente, la investigación en ingeniería del producto se inicia en esta universidad en el campo de la Reología de fluidos complejos tales como betunes asfálticos, emulsiones, fases micelares y líquido-cristalinas o grasas lubricantes. En el campo de los asfaltos, la labor investigadora se remonta al año 1994 en el ámbito del proyecto de investigación "Estudio de aditivos para productos asfálticos para mejorar sus resistencias a disolventes orgánicos, resistencia mecánica y conseguir coloreabilidad", subvencionado por la Junta de Andalucía (Programa de Cooperación Industrial de la Consejería de Industria, Comercio y Turismo) y realizado en colaboración con ERTOIL S.A.

Paralelamente, durante esos primeros años, se abordan otros proyectos relacionados con nuevas técnicas de procesamiento, en colaboración con el Departamento de Ingeniería Química de la Universidad de Cambridge, en el marco de una Acción Integrada titulada "Microestructura y procesamiento de emulsiones alimentarias", donde se estudiaron el procesamiento mediante flujo oscilatorio. Igualmente, se están desarrollando nuevas técnicas de caracterización reológica de fluidos complejos, parte de las cuales se sitúan también en el marco del proyecto "Asymptotic theory of thin walled structures applied to characterisation of viscoelastic materials" en colaboración con la "Free University of Brussels", el "Institute for Problems in Mechanics (Russia)" y la "Saratov State University" y financiado por la Unión Europea (Proyectos INTAS).

En relación con el estudio de emulsiones y emulsionantes, otro tema de investigación se centra en la caracterización del comportamiento de fases y reológico de sistemas modelo tensioactivo/agua, en el que el agente tensioactivo es susceptible de formar distintas agregaciones, como sistemas micelares o como mesofases líquido-cristalinas. En este ámbito, se encuentra que el comportamiento reológico está estrechamente relacionado con el tipo de estructura formada por el tensioactivo, y que esto es determinante en el comportamiento reológico y en las propiedades de las emulsiones formadas con estos sistemas.

Otra línea que se inicia por entonces, y en la que aún se sigue trabajando, estaba dedicada al estudio del comportamiento reológico de grasas lubricantes y su relación con la optimización del procesamiento y de la bombeabilidad de éstas. Esta línea de investigación nació como resultado de una colaboración con la empresa Brugarolas S.A. en donde se intentaba relacionar el comportamiento reológico de las grasas con dificultades encontradas en su bombeabilidad.

En definitiva, durante esos primeros años la investigación en ingeniería del producto se centró en la formulación, procesamiento, microestructura, Reología y aplicación de productos químicos

cuya funcionalidad estaba determinada por su estructura, los llamados productos químicos estructurados. Esta investigación nos permitió colaborar con sectores industriales tan diversos como el petroquímico, alimentario, transportes, detergentes, etc. Desde entonces, la diversidad de productos químicos abordados por el Grupo de Ingeniería de Fluidos Complejos de la Universidad de Huelva ha ido creciendo y, también, orientado hacia el cuarto paradigma de la ingeniería química que se empieza a plantear, la sostenibilidad. Con esta visión nace en 2011 el Centro de Investigación en Tecnología de Productos y Procesos Químicos (Pro²TecS) ante la constatación de un creciente interés industrial por los procesos y productos relacionados con la industria de transformación (química, bioquímica, agroalimentaria, farmacéutica, cosmética, materiales de construcción, etc.). Como resultado, Pro²TecS ha centrado su actividad en dichos productos, generalmente multifásicos y multicomponentes, que tienen características funcionales que los hacen aceptables por parte del consumidor y que se caracterizan por su alto valor añadido y/o buscan la valorización de subproductos y residuos y el uso de materias primas y/o recursos renovables. Todo ello a través de procesos que minimicen los vertidos, impliquen un ahorro energético y, en conjunto, potencien el desarrollo de tecnologías limpias y sostenibles.

En resumen, como se puede ver en la Figura 11, desde nacimiento de la Universidad de Huelva, la ingeniería del producto ha sido el motor que ha impulsado gran parte de la investigación y la docencia del profesorado del Área de Conocimiento de Ingeniería Química. La incorporación de esta nueva disciplina, que emerge a nivel mundial como un nuevo paradigma, dentro del programa académico de nuestros egresados ha contribuido a la modernización de los estudios en ingeniería química, y ha convertido a esta universidad en pionera en este campo del conocimiento.

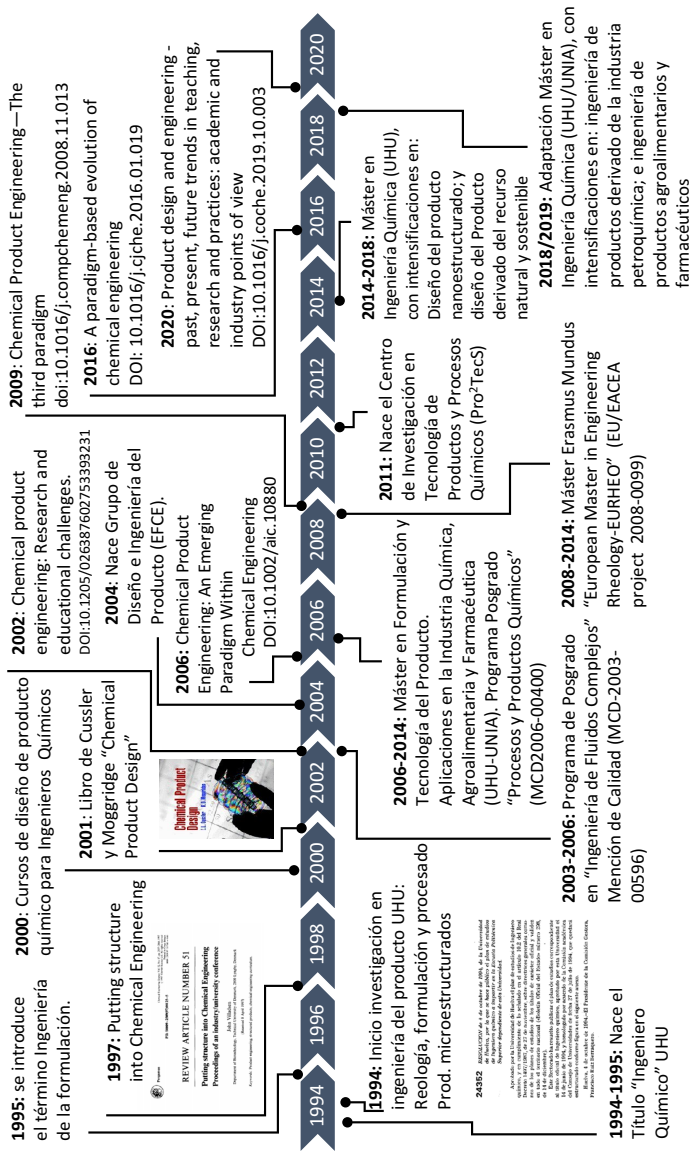


Figura 11. Nacimiento y desarrollo de la ingeniería del producto químico en el contexto internacional de la Ingeniería Química (parte superior) y en la Universidad de Huelva (parte inferior). Figura adaptada de Costa et al. (2006)

6. CONCLUSIONES

La ingeniería química tiene una larga tradición y una metodología probada de diseño de procesos relacionados con la química básica, caracterizados por un elevado volumen y variedad de producción de moléculas, normalmente con un bajo valor añadido. No obstante, hoy en día, cada vez son más numerosas las empresas químicas con interés en el desarrollo de productos con mayor valor añadido. Se puede suponer que el tercer paradigma, la ingeniería del producto químico, se impuso por la lucha por el rendimiento técnico y económico de los productos generados en un entorno de mercado fuertemente competitivo.

La ingeniería del producto ha evolucionado de un concepto a un paradigma debido a los grandes cambios en la industria química, donde el papel y los méritos del diseño de productos aumentan continuamente. Sin embargo, esto no es un argumento para que el diseño de procesos desaparezca. El diseño de productos y el diseño de procesos deben utilizarse conjuntamente, adaptándose a los cambios en la industria química. Por supuesto, la ingeniería del producto como paradigma no impide que surjan otros paradigmas, como el de la ingeniería química sostenible, ni sustituye a las operaciones unitarias o a la ciencia de la ingeniería química (los fenómenos de transporte) como paradigmas.

En este contexto, una mentalidad de ingeniería de productos es esencial para que los ingenieros químicos sean capaces de resolver problemas en los que tanto el producto como su proceso de fabricación deben ser identificados, una clase de problemas totalmente nuevos y de gran relevancia. Problemas en los que se verán involucrados una amplia variedad de diferentes categorías de productos químicos, que tienen poco en común y cambian en función de su apariencia, microestructura, función o rendimiento. A pesar de esto, se pueden encontrar similitudes entre ellos en cuanto a su desarrollo y fabricación. La ingeniería del producto químico debe ser capaz de proporcionar un marco común de conocimientos, enfoques, metodologías e instrumentos, que pueda ser empleado para analizar, desarrollar y producir toda la gama

de productos químicos. Los marcos que abordan la ingeniería del producto se asocian principalmente con una visión del proceso de desarrollo que se basa en la demanda del mercado. Los conceptos de diseño de productos químicos y de ingeniería de productos químicos no son considerados como sinónimos, estableciéndose en algunos casos cierta secuencialidad entre ellos y en otros se requiere una integración de ambos conceptos. Esto último es especialmente necesario en el caso de desarrollo de productos químicos estructurados.

El cambio de los procesos químicos a los productos químicos implica un lógico cambio en el enfoque de la investigación y la enseñanza de la ingeniería química. El cambio hacia esta nueva y más amplia ingeniería debe ser evolutivo, no revolucionario. Se considera que el establecimiento de la ingeniería del producto como una universalidad de la ingeniería química puede hacer más fácil la transición de esta disciplina, y de la industria química, hacia la economía del conocimiento, en la que el crecimiento depende de la cantidad, la calidad y la accesibilidad, más que de los medios de producción.

La incorporación de la docencia de la ingeniería del producto químico en el contexto de los estudios de Ingeniería química tiene aún numerosos retos que deben ser abordados. Entre ellos, que el diseño y la ingeniería del producto es un campo muy interdisciplinario, con gran énfasis en una amplia gama de temas de ciencia y tecnología, que también requiere la participación de la esfera empresarial. Conscientes de ello, y prácticamente desde el nacimiento de la Universidad de Huelva, la ingeniería del producto ha sido el motor que ha impulsado gran parte de la investigación y la docencia del profesorado del Área de Conocimiento de Ingeniería Química. La incorporación de esta nueva disciplina, que emerge a nivel mundial como un nuevo paradigma, dentro del programa académico de nuestros egresados ha contribuido a la modernización de los estudios en ingeniería química, y ha convertido a esta universidad en pionera en este campo del conocimiento.

7. BIBLIOGRAFÍA

- Bernardo F, Pistikopoulos E, Saraiva P. (2001) Quality costs and robustness criteria in chemical process design optimization. *Computers & Chemical Engineering*, 25, 27-40.
- Bird R.B., Stewart W.E, y Lightfoot E.N. (1960) *Transport phenomena*, first ed. John Willey & Sons, Inc., New York.
- Bird, R. B., Stewart, W. E., y Lightfoot, E. N. (2002) *Transport phenomena*, 2nd ed..Wiley. NewYork
- Carrasco-Rosa, A. (2007) La sociedad de consumo: origen y características, *Contribuciones a la Economía*. <http://www.eu-med.net/ce/>
- Charpentier J y Trambouze P. (1998) Process engineering and problems encountered by chemical and related industries in near future. *Chemical Engineering and Processing*, 37, 559-565.
- Charpentier J.C. y McKenna TK. (2004) Managing complex systems: some trends for the future of chemical and process engineering. *Chemical Engineering Science*, 59, 1617-1640.
- Charpentier JC. (2002) The triplet "molecular processes - product - process" engineering: the future of chemical engineering?. *Chemical Engineering Science*, 57, 4667-4690.
- Committee on Chemical Engineering Frontiers. (1988) *Frontiers in chemical engineering: Research needs and opportunities*. National Academy Press. Washington.
- Costa, R., Moggridge, G. D., y Saraiva, P. M. (2006) Chemical product engineering: An emerging paradigm within chemical engineering. *AIChE Journal*, 52, 1976-1986.
- Cussler, E. L., y Moggridge G. D. (2001) *Chemical Product Design*, first edition. Cambridge University Press. New York.
- Cussler, E. L., y Moggridge G. D. (2011) *Chemical Product Design*, second edition. Cambridge University Press. New York.
- Cussler, E. L., y Wei, J. (2003) Chemical product engineering. *AIChE Journal*, 49, 1072-1075.
- Favre, E., Marchal-Heusler, L., y Kind, M. (2002) Chemical product engineering: Research and educational challenges. *Transactions of IChemE*, 80A, 65-74.

- Heinzle E., Biewer A. y Cooney C. (2006) Development of sustainable bioprocesses, John Wiley & Sons, Inc., West Sussex.
- Hill, M. (2004) Product and Process Design for Structured Products. *AIChE Journal*, 50, 1656-1661.
- Hill, M. (2009) Chemical Product Engineering—The third paradigm, *Computers and Chemical Engineering*, 33, 947-953
- Jaworski Z. y Zakrzewska B. (2011). Towards multiscale modelling in product engineering. *Computers & Chemical Engineering*, 35, 434-445.
- Klemes J. (2011). Sustainability in the process industry: integration and optimization, Mc Graw-Hill, Inc., New York.
- Kuhn, T. S. (1996) The structure of scientific revolutions. University of Chicago Press. Chicago.
- Lee CKH (2019) A knowledge-based product development system in the chemical industry. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 30, 1371-1386.
- Mashelkar, R. A. (1995) Seamless chemical engineering science: The emerging paradigm. *Chemical Engineering Science*, 50, 1-22.
- Moggridge GD y Cussler EL (2000) An introduction to chemical product design. *Trans IChemE - Part A*; 78, 5-11.
- Narodoslawsky M. (2013) Chemical engineering in a sustainable economy, *Chemical Engineering Research and Design*, 91, 2021-2028.
- Núñez, N., Martín-Alfonso J.E., Valencia C., Sánchez M.C. y Franco J.M. (2012) Rheology of new green lubricating grease formulations containing cellulose pulp and its methylated derivative as thickener agents, *Industrial Crops and Products*, 37, 500-507.
- Peppas, N.A. (2016), The First Century of Chemical Engineering, Distillations-Science History Institute. <https://www.sciencehistory.org/distillations/the-first-century-of-chemical-engineering>.
- Phadke M. (1989) Quality engineering using robust design. Prentice Hall. Upper Saddle River.

- Saraiva PM y Costa R. A (2004) Chemical product design course with a quality focus. *Trans IchemE - Part A*, 82, 1474-1484.
- Schubert H., Ax K. y Behrend O. (2003) Product engineering of dispersed systems. *Trends Food Science & Technology*, 14, 9-16.
- Seider, W. D., Seader, J. D., Lewin, D. R. y Widagdo, S. (2009) *Product and process design principles: Synthesis, analysis, and evaluation* (3rd ed.). Wiley. Hoboken.
- Uhlemann J., Costa R. y Charpentier, J.C. (2020) Product design and engineering-past, present, future trends in teaching, research and practices: academic and industry points of view. *Current Opinion in Chemical Engineering*, 27, 10-21.
- Uhlemann, J, Costa, R. y Charpentier, J.C. (2019). Product design and engineering in chemical engineering: past, present state and future. *Chemical Engineering & Technology*, 42, 2258-2274.
- Unger R.M. (2019) *The Knowledge Economy*. Verso. London.
- Valiente-Barderas, A. (2015) Paradigms in Chemical engineering. *The International Journal of Engineering and Science (IJES)*, 4, 2319-1805.
- Villadsen, J. (1997) Putting Structure into Chemical Engineering, *Chemical Engineering Science*, 52, 2857-2864.
- Villermaux J. (1993) Future challenges for basic research in chemical engineering, *Chemical Engineering Science*, 48, 2525-2535.
- Walker H., Lewis W.K. y Mc Adams W.H. (1923), *Principles of chemical engineering*, Mc Graw-Hill, Inc., New York.
- Wei, J. (1996). A century of changing paradigms in chemical engineering. *Chem Tech*, 26, 16-18.
- Wesselingh J.A. (2001) Structuring of products and education of product engineers. *Powder Technology*, 119, 2-8.
- Westerberg A.W. y Subrahmanian E. (2000) Product design. *Computers and Chemical Engineering*, 24, 959-966.
- Wibowo C. y Ng, K.M. (2002). Product-Centered Processing: Manufacture of Chemical-Based Consumer Products, *AIChE Journal*, 6, 1212-1230.

- Wintermantel K. (1999). Process and product engineering -achievements, present and future challenges. *Chemical Engineering Science*, 54, 1601-1620.
- Woinaroschy, A. (2016) A paradigm-based evolution of chemical engineering, *Chinese Journal of Chemical Engineering* 24, 553-557.
- Yang S.T. (2007) *Bioprocessing for value-added products from renewable resources*. Elsevier, Amsterdam.
- Yuliestyan, A., Gabet, T., Marsac, P., Garcia-Morales M. y Partal, P. (2018). Sustainable asphalt mixes manufactured with reclaimed asphalt and modified-lignin-stabilized bitumen emulsions. *Construction and Building Materials*, 173, 662-671.



Universidad
de Huelva

SE ACABÓ DE EDITAR ESTA
LECCIÓN INAUGURAL DEL
CURSO ACADÉMICO 2020-2021
CON EL TÍTULO “LA INGENIERÍA
DEL PRODUCTO QUÍMICO” EL
DÍA 25 DE SEPTIEMBRE,
EFEMÉRIDE DE LA PARTIDA DEL
SEGUNDO VIAJE DE CRISTÓBAL
COLÓN HACIA AMÉRICA

