

EVOLUCIÓN DE LOS PRODUCTOS QUÍMICOS Y DE LOS PROCEDIMIENTOS DE FABRICACIÓN

ARTURO ROMERO SALVADOR *

* Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Valverde 22, 28004 Madrid.

1. INTRODUCCIÓN

Entre los diferentes seres vivos, solo la especie humana puede cambiar la regla de adaptarse o morir por otra diferente, transformar para vivir. La creciente capacidad que tiene la especie humana para modificar la Naturaleza trae como consecuencia que el equilibrio mantenido durante muchos años se vaya desplazando paulatinamente hacia nuevas posiciones cuyos efectos, para las actuales y futuras generaciones, son desconocidos.

Nuestra civilización está basada en la compleja red de actividades productivas, de servicio y de hábitos de consumo que han ido implantado las organizaciones sociales. El papel recuperador y regenerador que los ecosistemas ejercen con los materiales que utilizan contrasta con la abundancia y acumulación de residuos que caracterizan a los tecnosistemas humanos. Además, en demasiados casos se resuelven los problemas fabricando sustancias que pueden provocar efectos negativos sobre la salud humana y el medioambiente porque son tóxicas, persistentes y bioacumulables. No es extraño que la preocupación —individual, colectiva e institucional— por el medioambiente se haya ido reforzando y consolidando, arrastrada por la secuencia de procesos de degradación en las más variadas formas y en los lugares más diversos del planeta.

La química es una ciencia clave para resolver problemas materiales como alimentación, vestido, vivienda, sistemas de información, movilidad, ocio o

salud. Con la introducción de métodos cuantitativos para estudiar las reacciones y el descubrimiento de las leyes que regulan su sentido y su velocidad, se fueron desarrollando técnicas y procedimientos que permitían sintetizar sustancias con las que sustituir con ventaja a los productos procedentes de la naturaleza. Comenzó la fabricación de una gran variedad de sustancias de manera eficiente y económica que hicieron realidad bastantes sueños que la humanidad había mantenido vigentes durante muchos años. Esta aportación que ha realizado la industria química sigue siendo imprescindible para resolver las carencias actuales y para hacer frente a las amenazas del futuro.

A medida que entraban en funcionamiento procesos químicos destinados a fabricar una gran variedad de productos iban apareciendo diferentes problemas relacionados con el ambiente. Unas veces estos problemas se manifestaban en forma de subproductos que acompañaban al producto objeto de fabricación, de residuos sólidos abandonados en los lugares más inesperados o de emisiones de sustancias contaminantes al aire y al agua cuyos efectos se manifestaban en los organismos vivos. Otras veces fueron sus propios productos finales los que ocasionaron, durante su etapa de aplicación o por medio de las sustancias formadas en su degradación, daños a la salud o provocaron el deterioro del ambiente.

Desde las últimas décadas del siglo XX se está produciendo un cambio cultural caracterizado por una modificación en la jerarquía de valores, entre ellos los ambientales, que ha servido para configurar nuestro

mundo industrial y para establecer las reglas que debe seguir en el futuro. La preocupación por conservar el patrimonio natural se debe traducir en un creciente interés de los consumidores por los productos que muestren beneficios ambientales y por evitar aquellas prácticas y procedimientos que pueden degradar el medio. La industria, como agente básico de la economía, se enfrenta a unos requerimientos ecológicos que dirigen su actividad hacia finalidades y resultados más aceptables por el medio.

A partir del informe de la Comisión Brundtland (Ref. 1), los conceptos de sostenibilidad y desarrollo sostenible se han asumido por parte de las principales instituciones internacionales como una de las grandes aspiraciones de las Naciones Unidas. El proceso hacia el desarrollo sostenible debe armonizar elementos sociales, económicos y ambientales con el fin de mejorar la calidad de vida de nuestras sociedades sin poner en peligro la de las generaciones futuras. Su consecución depende de la capacidad de combinar una economía competitiva con una menor degradación ambiental y una mayor eficiencia en la gestión de los recursos con mayores tasas de empleo.

2. DE LA FAMILIA A LA QUIMIFOBIA

2.1. Los productos químicos y el ambiente

El marco en el que se inicia el desarrollo de la actividad química se caracteriza porque el impulso fundamental procedía de la propia sociedad que demandaba mayores cantidades de productos que satisfacían sus necesidades, pedía nuevos productos porque suponía que mejoraría su calidad de vida o mostraba necesidades para las que esperaba una respuesta. Este era el progreso y la modernidad a los que la química daba innumerables satisfacciones. La sociedad aceptaba de buen grado sus realizaciones y disculpaba los errores y accidentes que con demasiada frecuencia se producían. Todos los inconvenientes, por grandes que fueran, quedaban compensados por la bondad de aquellos productos que permitían avances materiales sin precedentes.

A partir de la II Guerra Mundial, aunque se siguen produciendo enormes avances en el campo de la Ciencia Química, la sociedad ya no los percibe como

algo positivo para mejorara su calidad de vida debido a que con ellos no se resuelven nuevas necesidades; simplemente resuelven las mismas de otra manera, manera que no supone ventajas inesperadas o diferentes de las que ofrece la natural mejora continuada.

Los avances producidos en los diferentes campos del saber, especialmente las nuevas y potentes técnicas analíticas, han ido demostrando y poniendo en conocimiento de los profesionales primero, y del público después, los perjuicios que las prácticas y productos de la industria química han ido generando, no solo para las personas que trabajan en sus instalaciones, sino para toda la población que, de una manera u otra, está expuesta, junto a los beneficios buscados, a sus efectos negativos.

La evolución seguida por la mayor parte de los productos que la industria ha puesto en el mercado para satisfacer distintas necesidades muestra el esfuerzo que ha realizado para evitar, una vez identificados, los daños y riesgos para el ambiente de esta actividad. Dos ejemplos: productos de limpieza y productos fitosanitarios.

La invención del jabón se produjo hace más de 5.000 años por los egipcios y los sumerios combinando grasas vegetales y animales con sustancias alcalinas. Los árabes fueron los principales fabricantes de jabón en España y los Reyes Católicos convirtieron las "almonas" en importantes núcleos de exportación a América. El hipoclorito sódico o lejía, es un producto descubierto por Berthollet en 1.785 en el barrio de París, Javel, razón por la que se denominó como agua de Javel. El reconocimiento de su poder desinfectante y antiséptico se inicia a finales del XIX, cuando Pasteur descubre que los microorganismos son los causantes de las enfermedades.

Varios científicos descubren a principios del siglo XX unas sustancias sintéticas, los tensioactivos, que en la actualidad continúan formando parte fundamental en la composición de los detergentes. El primero de estos tensioactivos, mucho más eficaz que el jabón, especialmente a bajas temperaturas y con aguas duras, que se utilizó a gran escala fue un alquilbenceno sulfonado. A finales de los años cuarenta del siglo XX se formuló el primer detergente moderno con esta sustancia tensioactiva, tripolifosfato sódico para reducir la

dureza del agua y carboximetil celulosa como agente que evitaba la deposición de la suciedad. Sus resultados fueron espectaculares y ejemplo de blancura pero ocasionaron problemas en los cauces de agua con sus persistentes espumas y lenta biodegradabilidad, y la proliferación de algas y plantas acuáticas. Los detergentes evolucionaron cambiando el alquilbenceno de cadena ramificada por otro de cadena lineal y los fosfatos por zeolitas y aditivos poliméricos.

Hasta finales del XIX no se conocían técnicas capaces de combatir las enfermedades y plagas de los cultivos por lo que epidemias como las de la filoxera, mildiu de la vid y de la patata, mosca del olivo, etc. produjeron destrucciones masivas de los cultivos y las correspondientes hambrunas. Los fitosanitarios empleados hasta la primera mitad del siglo XX eran productos químicos inorgánicos: ácido sulfúrico como herbicida, las sales como insecticidas, el azufre y el caldo bordelés (sulfato de cobre neutralizado con cal) como fungicidas e incluso ciertos productos naturales como la nicotina o las piretrinas.

A mediados del siglo XX aparece una serie de nuevos productos fitosanitarios, probablemente como consecuencia de los resultados de investigaciones pre-

vias realizadas para encontrar armas químicas, entre los que destacan los herbicidas hormonales (Fenoxiacidos), los insecticidas clorados y fosforados y la familia de ditiocarbamatos como fungicidas. En los años siguientes han ido apareciendo continuamente nuevas familias químicas con productos cada vez más selectivos e inocuos para el hombre y para el ambiente.

Los progresos tecnológicos en productos fitosanitarios, lo mismo que ocurrió en muchos otros campos de actividad, no han considerado durante bastantes años que, junto a los beneficios obtenidos, se podían producir efectos secundarios negativos para la salud humana y para el ambiente. Sus éxitos hacían olvidar las prácticas y conocimientos ancestrales, cuya base fundamental era un equilibrio biológico entre plagas y cultivos.

2.2. Procedimientos de fabricación

Una industria química puede describirse como un centro industrial que recibe materias primas y energía con las que realiza las transformaciones necesarias para obtener unos productos destinados al mercado. Simultáneamente a los productos a obtener se forman



Figura 1. Esquema de entradas, salidas y operaciones que se realizan en la industria química.

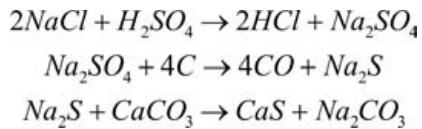
también otras sustancias no deseadas y que de una manera u otra pueden acabar en el medio, al que afectan de modo negativo y se les denomina contaminantes.

En la Figura 1 se muestra un esquema que representa las operaciones que se realizan para transformar las materias primas en productos.

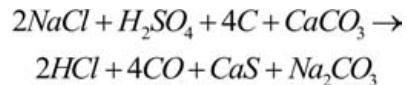
La industria química comienza su actividad antes de que se haya establecido la metodología de realización de experimentos a pequeña escala, en los que comprobar el comportamiento de las hipótesis en las que se basan las distintas operaciones que se requieren en el proceso de fabricación. Si se desea obtener los productos que demanda la sociedad es necesario utilizar todos los conocimientos disponibles y comprobar los resultados que se obtienen al aplicarlos. Este modo de trabajar tiene como consecuencia que los errores y dificultades del procedimiento solo aparecen cuando se comienza la fabricación y por ello a escala demasiado grande.

A medida que se realiza la actividad productiva se van conociendo las distintas limitaciones y problemas que plantea el proceso. Cada uno de los problemas detectados requiere una solución adecuada que una vez encontrada supone el perfeccionamiento del método de fabricación. Según se van resolviendo problemas y limitaciones se logra que el proceso se aproxime a su madurez. Es en esta aproximación del proceso hacia el límite de sus posibilidades cuando comienzan a aparecer los procesos alternativos, que pretenden obtener el producto con métodos que superan a su rival al evitar sus limitaciones y problemas. Del mismo modo que el método desplazado, el nuevo método, según se vaya aplicando y aportando experiencia, presentará sus propias limitaciones y problemas, que deberán resolverse a lo largo de su vida útil.

Cuando se necesitó un producto alcalino para cubrir las necesidades de la industria textil y de la fabricación de jabón en cantidades que no se podían satisfacer utilizando materias primas de origen vegetal (lixiviación de las cenizas procedentes de la combustión de madera, “barrilleras”,) se instala el procedimiento Leblanc para obtener carbonato sódico a partir de cloruro sódico y carbonato cálcico, utilizando ácido sulfúrico y carbón como materias auxiliares:



Siendo la reacción global:



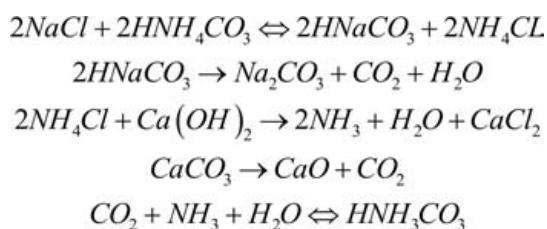
La aplicación del procedimiento ocasionaba graves problemas para la salud de los trabajadores y para el ambiente debido a que se formaban grandes cantidades de ácido clorhídrico que acababan en la atmósfera de la planta de fabricación y en los pulmones de los que allí trabajaban (Figura 2). La emisión de estos gases de proceso mediante chimeneas cada vez más altas no resolvía el problema, lo cambiaba de lugar y eran los vecinos los que inundaban a los fabricantes de sosa con sus pleitos. El escándalo de esta contaminación fue tan grande que se tradujo en la aparición, en Inglaterra, de la denominada Ley de los Álcalis de 1863, destinada a la protección del ambiente. Sin embargo, al no existir otra alternativa para la fabricación de la sosa que se demandaba, fue necesario modificar el procedimiento para evitar sus graves inconvenientes, instalándose una torre de lavado que permite retener gran parte del HCl que se libera en el proceso. Este clorhídrico recuperado, previa transformación en cloro, se utilizó para blanquear el papel de esparto. Otro inconveniente medioambiental, debido al residuo de sulfuro cálcico formado, se resolvió desprendiendo el ácido sulfhídrico mediante un borboteo con dióxido de carbono y transformando parte del ácido desprendido en dióxido de azufre y efectuando la reacción entre ambos compuestos para transformar, de la misma manera que el HCl, un residuo en un producto valioso, azufre.

Aunque los procedimientos evolucionan continuamente para adaptarse a las exigencias, económicas o ambientales que se plantean en cada momento, acaban siendo desplazados por otros que se han concebido para que se adapten, desde que nacen, a las exigencias de ese momento y comienzan a competir una vez que han alcanzado un grado de desarrollo suficiente. En el caso de la fabricación de sosa, el denominado método Solvay (se inicia en 1.860 pero no se impone hasta principios del siglo XX) resolvía todos los problemas

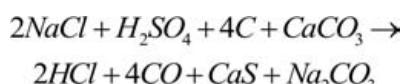


Figura 2. Operaciones en el método Leblanc. (A) Extracción de sosa a partir de la ceniza negra. (B) Purificación por cristalización. Tomado de Referencia 2 (T.K. Derry y T.I. Williams. Historia de la Tecnología. Volumen 3).

ambientales que tenía el de Leblanc, ya que al emplear amoníaco el subproducto del proceso es cloruro cálcico:



Siendo la reacción global:



2.2.1. Las tecnologías ambientales de fin de línea

La publicación de “Silent Spring” en 1962 por Rachel Carson (Ref. 3) provocó un gran impacto en la sociedad americana. Tras la crisis del petróleo de los años 70 aparecen leyes de control de la actividad industrial que exigen, entre otras medidas, técnicas destinadas a evitar que los contaminantes alcancen el medio.

Este interés por la protección ambiental se ha traducido en el desarrollo y utilización de tecnologías destinadas a controlar la contaminación al final del proceso limitando vertidos y emisiones de contaminantes. Con la aplicación de estas tecnologías se logra

mejorar la calidad del aire y del agua ya que con su empleo se alcanza el objetivo de limitar la liberación de sustancias tóxicas. En la Figura 3 se muestra un ejemplo de estas tecnologías de fin de línea que se emplea para depurar los gases emitidos en plantas de ácido nítrico.

A medida que la legislación ambiental ha ido imponiendo limitaciones cada vez más estrictas para las emisiones, vertidos y deposición de residuos, fue necesario introducir modificaciones en las plantas existentes que permitieran adaptarlas al nuevo marco legal vigente mediante estas tecnologías ambientales de fin de línea. Para cumplir los valores de emisión establecidos las industrias deben instalar filtros, convertidores catalíticos, absorbedores o cualquier otro

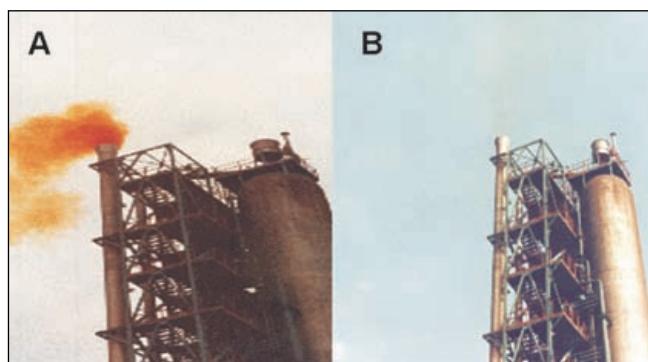


Figura 3. Emisiones de plantas de ácido nítrico. (A) Sin medidas específicas para eliminar contaminantes. (B) Despues de instalar un convertidor catalítico para transformar los óxidos de nitrógeno mediante el proceso SCR (Reducción Catalítica Selectiva).

procedimiento, al final de los equipos utilizados en los procesos de producción.

Sin embargo, estos planteamientos curativos provocan continuas disputas entre los distintos actores ambientales. Para unos suponen costes excesivos y sujetos a la voluntad del legislador, mientras que para otros son un medio de cumplir la legislación, trasladando los contaminantes de un medio a otro, sin abordar la causa del problema. El aumento continuo de los costes, junto a las limitaciones técnicas de determinados procesos, en muchos casos demasiado antiguos y a veces obsoletos, obligó a cerrar instalaciones y a sustituirlas por otras adaptadas a los condicionantes ambientales.

Aunque el desarrollo, difusión y aplicación de estas tecnologías de fin de línea ha seguido un proceso continuado, actualmente el debate ambiental ha derivado hacia cuestiones más complejas como el agotamiento de los recursos, la reducción de los residuos, el cambio climático o los contaminantes persistentes. Del mismo modo que para poder cumplir los cada vez más pequeños límites de emisión fue preciso desarrollar y aplicar una tecnología ambiental, creada para este fin o adaptada de la tecnología disponible en procesos de fabricación, este nuevo planteamiento del debate ambiental necesita concebir y aplicar las herramientas apropiadas.

2.2.2. Las tecnologías de prevención

El impacto ambiental de las plantas industriales se reduce si se identifica el origen de los residuos y de los contaminantes y se toman las medidas capaces de evitar su formación. Con el nombre de producción más limpia se designa a una estrategia preventiva orientada a reducir al mínimo el impacto de la producción y de los productos sobre el medio ambiente, aplicando tanto tecnologías apropiadas como medidas de organización necesarias. Estas tecnologías no limitan su objetivo a reducir las emisiones al final de línea sino que también pretenden disminuir el uso de recursos y limitar el empleo de sustancias tóxicas a lo largo de la vida del producto.

Según este planteamiento, una tecnología de prevención es la que evita o reduce los problemas ambientales a lo largo de todo el ciclo de vida del producto

integrando los procesos y los productos con el fin de conseguir:

- Reducir al mínimo el volumen y los peligros de los residuos gaseosos, líquidos y sólidos.
- Reducir el riesgo de accidentes en todas las operaciones en que intervienen los productos químicos.
- Reducir al mínimo el consumo de materias primas, agua y energía.
- Utilizar los productos y procesos que cumplan el fin perseguido pero que supongan el menor peligro para la salud humana y el ambiente.

El planteamiento de estas tecnologías es diferente al efectuado por las tecnologías de fin de línea ya que su objetivo es establecer una relación más equilibrada entre el medio ambiente social y el físico.

El papel puede considerarse como un producto natural, biodegradable, recicitable y fabricado a partir de fuentes renovables como son las plantas y el agua. Sin embargo, en el proceso de fabricación se utilizan grandes cantidades de reactivos químicos y se producen también importantes cantidades de residuos contaminantes que es preciso tratar y eliminar. Especialmente significativos son los compuestos organoclorados que se producen en el proceso de blanqueo con cloro gaseoso y la carga orgánica de las aguas residuales del proceso de obtención de la pasta. Las medidas destinadas a retener los contaminantes generados en el proceso y evitar que lleguen al ambiente son tecnologías de fin de línea, con lo cual los costes aumentan cada vez que la legislación marca límites de emisión menores.

La situación ideal para esta industria es la de un proceso en el que solo entre la madera como materia prima y las salidas de la planta se limiten a la pasta, energía, dióxido de carbono y agua. Este objetivo significa que todos los productos utilizados en la fabricación se reciclan completamente. La evolución hacia las denominadas tecnologías limpias se realiza por medio de un proceso continuo de modificaciones destinadas a eliminar los problemas planteados, es decir, evolucionando en la dirección de reciclar los reactivos y aprovechar los residuos en el proceso de cocción, evitar o reducir la cantidad de cloro empleada en el proceso de blanqueo.

2.3. Buscando una explicación al cambio

Actualmente una parte significativa de la población percibe la industria química, a pesar de ser una fuente de bienestar y progreso, como una actividad depredadora de recursos naturales, destructora de la calidad ambiental y peligrosa para la vida de los seres humanos. Los profesionales de la industria química no comprenden las críticas que recibe el sector, ¿Por qué se rechaza una industria que ha proporcionado a la sociedad un nivel de bienestar económico que no hubiera soñado el modernista más utópico?

Algunos elementos internos han contribuido a esta transformación de la percepción que nuestra sociedad tiene sobre esta industria. Durante los últimos 200 años se ha centrado el objetivo económico en disminuir los costes unitarios y en la optimización del proceso de producción como procedimiento para conseguirlo. La competitividad empresarial mal entendida se ha encargado de sembrar dudas, innecesarias en muchos casos, de difundir y agrandar los errores de la competencia, a la vez que ocultar e incluso negar los propios. Ante esta situación que ha durado bastantes años no podía esperarse otra reacción social que el temor a los riesgos diferidos, graves y generalizados, de las actividades químicas y el deseo de sustituir sus productos por otros que den el mismo servicio pero que no procedan de la industria química. Es difícil aceptar que la contribución de este tipo de elementos sea suficiente para explicar un cambio tan profundo y probablemente haya que buscar otras contribuciones de diferente naturaleza que ayuden a explicar la transición de la quimifilia a la quimifobia.

La cultura moderna consideraba a la ciencia como el elemento fundamental para explicar la vida humana y a la tecnología como el procedimiento capaz de resolver los problemas generales de la humanidad y los concretos de cada uno de los individuos. El equilibrio entre la razón y la ciencia podría considerarse como la piedra filosofal del modernismo. Es en la década de los setenta cuando la cultura modernista entra en crisis y el progreso científico-tecnológico se fue desplazando del centro que había ocupado durante muchos años. En su lugar aparece el conservacionismo y el convencimiento de que toda innovación o progreso científico puede producir un riesgo desconocido. El hombre

de nuestros días no solo teme a las catástrofes naturales, teme también a las catástrofes científicas que son el testimonio de los peligros que encierran los adelantos científicos. De este modo se induce un temor difuminado que puede concretarse en cualquier lugar y puede deberse a cualquier progreso ya que la falta de pruebas de hoy no implica que estudios posteriores demuestren mañana lo contrario.

Sentir temor y rechazo hacia los productos que proceden de las instalaciones que configuran la industria química es uno de los rasgos que identifican la sociedad posmoderna. La “quimifobia” no valora las aportaciones que a lo largo de la historia se han podido realizar gracias a la transformación de unas sustancias en otras. Tampoco reconoce que es imprescindible seguir utilizando la química para mantener el modelo implantado en las sociedades actuales. La “quimofobia” no pretende distinguir entre las prácticas químicas respetuosas con el medio y las agresivas; no pretende distinguir entre productos imprescindibles y productos superfluos; no pretende conocer las posibilidades de obtener productos por otras vías alternativas; no pretende, en fin, realizar una valoración fundamentada en criterios concretos, simplemente utiliza la química y a la vez la ignora. Probablemente la “quimifobia” no es otra cosa que la percepción que tiene esta sociedad de un riesgo muy superior al real y el temor a posibles peligros desconocidos y no intencionados de los productos químicos.

Esta situación, que es general en todos los sectores de la industria química aunque tiene algunas excepciones, como la industria farmacéutica y la relacionada con la salud, o la industria de productos para las nuevas tecnologías, ha generado un marketing socioeconómico cuya finalidad es la de crear una opinión que influya en las diferentes prácticas de producción y de consumo de modo que se eviten problemas potenciales en la salud de los consumidores y en la calidad ambiental. Así, con la aparición de los denominados productos ecológicos se ha creado un mercado dirigido a los colectivos sensibilizados por los aspectos ambientales y de mayor nivel de vida. En su comercialización se destaca que han sido fabricados con procedimientos respetuosos con el medio, como ocurre, por ejemplo, con los productos alimentarios denominados biológicos o naturales.

3. LA INDUSTRIA QUÍMICA Y EL DESARROLLO SOSTENIBLE

El deseo que tienen las sociedades avanzadas por disfrutar de una calidad ambiental cada vez más alta, junto al aumento constante de las actividades productivas y potencialmente contaminantes, y el conocimiento científico, en continua expansión y mejora, alertando sobre riesgos reales de una gran variedad de sustancias sobre la salud y el ambiente, obligan a imponer límites de emisión cada vez menores. Su cumplimiento solo es posible si se emplean las tecnologías ambientales, tecnologías creadas para evitar que los productos identificados como potencialmente nocivos lleguen al medio en concentraciones consideradas excesivas, o recurriendo al empleo de tecnologías blandas o más limpias.

Aceptando este nuevo marco de operaciones que se ha implantado en el actual mundo globalizado, la industria química de las próximas décadas debe plantear una nueva estrategia para que esta posibilidad que ofrece la naturaleza de reagrupar los átomos de las moléculas siga dando frutos a las sociedades humanas, frutos que estas, de una u otra manera, demandan. Por ello, un objetivo fundamental de las actuales industrias químicas es la fabricación de productos mediante procedimientos seguros y solo productos cuya aplicación y eliminación se pueda garantizar aplicando los actuales conocimientos científicos. Además, se necesitan tecnologías que apliquen procesos cada vez más eficientes, con menor consumo de recursos naturales, menor generación de sustancias no deseadas, que se realicen las operaciones con mayor seguridad y con una mejora continua de la calidad de los productos fabricados. La consecución de estos objetivos es fundamental para que la empresa química pueda competir en el mercado y sobrevivir.

El desarrollo sostenible solo es posible si se produce una reducción considerable del consumo de recursos mediante una reorientación de la economía industrial. Cuando se pretende reducir el flujo de recursos destinados a satisfacer necesidades es preciso que la estrategia empresarial se dirija hacia la venta de prestaciones y no hacia la venta de productos. Centrar el objetivo económico en el valor de utilización durante el mayor tiempo posible se traduce en un descenso del consumo de recursos materiales y

energéticos y en un descenso de la producción de residuos.

Es preciso que las sustancias y energías consideradas residuales se incorporen al circuito de fabricación en la mayor medida posible, del mismo modo que deben evitarse las pérdidas de materiales y de energía que puedan aprovecharse de alguna manera, aislamiento, incineración, etc.

En los últimos años del siglo XX aparecieron varias líneas estratégicas de la industria química en una dirección muy diferente al tradicional ocultismo del secreto industrial, a la pretendida superioridad de conocimientos, cuando no desprecio por los interlocutores ajenos a la actividad o a los debates de bondades frente a maldades, del poco racional, “y lo otro es peor aunque no se diga nada contra él”, y del basado en citas y contracitas. La industria química debe aceptar que el avance científico no es ya un valor absoluto y que la investigación y el desarrollo no los únicos componentes básicos de la industria y del negocio químico. Además, el trabajo para innovar en nuevas moléculas o nuevos procesos debe ir acompañado de un esfuerzo destinado a conocer la percepción social de las actividades químicas y de los valores imperantes para conseguir la mejor comunicación posible con los destinatarios de sus productos.

3.1. Compromiso de progreso

El programa Compromiso de Progreso (Responsible Care) es una iniciativa que han tomado las empresas químicas de forma voluntaria para lograr que sus actividades se realicen de modo que continuamente aumente la seguridad, la protección de la salud y la del medio ambiente, siguiendo los principios que establece el desarrollo sostenible. En 1993, gestionado por FEIQUE (Federación Empresarial de la Industria Química Española), se implantó en España este programa internacional que actualmente se desarrolla en la mayor parte de los países industrializados (Ref. 4).

La mayor parte de las empresas químicas españolas se han adherido al Compromiso de Progreso que está configurado por seis Código de Gestión:

- Protección del medio ambiente

- Seguridad y salud en el trabajo
- Seguridad en los Procesos
- Distribución
- Tutela de Producto
- Comunicación

Consciente de la gran importancia que tienen las propiedades de los productos químicos, es la propia empresa la principal interesada en conocer todos los aspectos relacionados con las sustancias que se fabrican en sus instalaciones para evitar a tiempo efectos negativos para la salud humana o para el medio. Además, y para garantizar el empleo adecuado de sus productos, asesora a sus clientes para la transformación segura y poco contaminante de sus productos. Finalmente, y cuando es necesario por el destino final del producto, informa a los consumidores sobre las prácticas que deben realizar para que la manipulación sea segura.

3.2. Reglamento REACH

En el medio natural existen sustancias peligrosas de origen biótico como los venenos presentes en algunas setas, por ejemplo la amanita muscaria. A estos productos naturales se han unido las sustancias que ha puesto en el mercado la industria química y la relacionada con ella. Para hacer frente a los riesgos que se derivan de la posible interacción con los seres vivos, el hombre ha desarrollado sistemas de gestión de seguridad de sustancias peligrosas basados en la información y el conocimiento. El contacto con las sustancias químicas, potencialmente peligrosas, es cada vez mayor y por ello son cada vez más frecuentes preguntas del tipo: ¿Es suficiente la información y el conocimiento que tenemos sobre los riesgos para la salud y el medio? ¿Se pueden fabricar y comercializar sustancias peligrosas sin que haya restricciones y sin un estricto control?

Mejorar la protección de la salud humana y del medio ambiente, manteniendo al mismo tiempo la competitividad y potenciando el espíritu innovador de la industria química, es el objetivo que pretende la Unión Europea al crear un sistema integrado único de registro, evaluación, autorización y restricción de sus-

tancias químicas conocido como REACH (Ref. 5). Este sistema obliga a las empresas que fabrican e importan productos químicos a evaluar los riesgos que implica su utilización y a adoptar medidas para gestionar cualquier riesgo identificado. De este modo las empresas son las responsables de garantizar la seguridad de los productos químicos comercializados, en lugar de que esta responsabilidad recaiga en las administraciones. Con esta iniciativa se pretende paliar la falta de conocimiento sobre los efectos que tienen las sustancias químicas sobre los ecosistemas y actuar en consecuencia, siendo las empresas las que tienen que suministrar información sobre los peligros, y sobre las medidas de reducción, de los productos químicos utilizados. Como la mayoría de las exigencias afecta a las grandes empresas es un elemento significativo del desarrollo sostenible.

El registro es el elemento fundamental de REACH. Las sustancias químicas fabricadas o importadas en cantidades superiores a una tonelada anual deberán registrarse obligatoriamente en una base central y no podrá fabricarse ni importarse ninguna sustancia que no esté registrada. Esta obligación implica que la industria deberá obtener la información pertinente sobre las sustancias que produce y emplear esta información para garantizar que su gestión sea segura. El registro incluye los datos correspondientes a sus propiedades, usos y precauciones de empleo. El número de parámetros que debe conocerse depende del volumen de producción y de los riesgos que implica la sustancia.

Aquellos productos que tengan propiedades preocupantes se deben someter a la autorización de la Comisión para usos particulares. Estas sustancias preocupantes incluyen a los que poseen efectos carcinogénicos, mutagénicos, son tóxicas para la reproducción; las persistentes, bioacumulables y tóxicas; y las que tengan efectos irreversibles graves sobre el ser humano o el ambiente. Cuando se pueden gestionar los riesgos derivados de la utilización de estas sustancias preocupantes de forma adecuada se concede la autorización pero si esto no es posible la Comisión considera el nivel de riesgo, el posible interés socioeconómico y la existencia de sustitutos para decidir en consecuencia. Los usuarios intermedios podrán utilizar una sustancia de este tipo con un fin para el que está autorizada, siempre que la sustancia se la haya proporcionado una

empresa que haya obtenido una autorización y se ajuste a las condiciones de tal autorización. Además, los usuarios deberán informar al órgano competente de esta situación de modo que las autoridades tengan pleno conocimiento de la forma de utilización de las sustancias con propiedades preocupantes.

El procedimiento de restricción tiene como objetivo administrar los riesgos que no están cubiertos de manera adecuada por el sistema REACH y garantizar también la seguridad de estos productos. Las restricciones que pueden proponerse se refieren a las condiciones de fabricación, a los usos y a la comercialización de una sustancia determinada, y si es necesario la restricción puede llegar a la prohibición de estas actividades.

Se estima que esta legislación europea sobre sustancias químicas obligará a registrar unas 30.000 sustancias químicas entre 2007 y 2018 en una agencia de control (Agencia Europea de Sustancias y Preparados Químicos) que exigirá más rapidez para los productos más peligrosos (cancerígenos o que afecten a la capacidad de reproducción) o los fabricados en cantidades superiores a las 1.000 toneladas.

3.3. Química verde

La preocupación por los temas ambientales ha impulsado la aparición de un nuevo enfoque dentro de la Química cuyo objetivo es prevenir o minimizar la contaminación en el origen evitando que se formen sustancias no deseadas y optimizando los recursos empleados. Con el diseño de productos y procesos químicos que reducen o eliminan la producción y uso de sustancias peligrosas se logra uno de los objetivos de la química sostenible.

El término Química Verde (QV) se utiliza para describir el desarrollo de un número cada vez más numeroso de productos y de procesos compatibles con el medioambiente (Ref. 6 y 7). La consolidación de la QV se produjo hace unos 15 años y su definición precisa la hacen Anastas y Warner: “La QV consiste en la utilización de una serie de principios encaminados a reducir o eliminar el uso y generación de sustancias peligrosas en el diseño, manufactura y aplicación de

los productos químicos”. Los siguientes pasos elementales pueden darnos una idea de cómo opera la Química Verde:

- Analizar si un determinado producto es necesario y si puede sustituirse por otro menos nocivo para las personas o para el medio ambiente (menor toxicidad, mayor biodegradabilidad).
- Seleccionar las materias primas más adecuadas para su preparación, con especial atención a fuentes renovables.
- Valorar las modificaciones que se pueden introducir en los procesos actualmente operativos para aumentar el rendimiento y la selectividad o para disminuir los riesgos (eliminación o cambio de disolventes, incorporación o cambio de catalizadores, etc.)
- Identificar los subproductos que se generan y sus potenciales usos como materias primas o productos auxiliares en otras síntesis.

Este planteamiento de la QV obliga a un trabajo en el que es preciso integrar conocimientos procedentes de diferentes campos como la química, ingeniería química, ciencia y tecnología de materiales, ecología, toxicología, entre otras. Reacciones mediante técnicas de fotocatálisis, electrocatálisis, biocatálisis, catálisis bifásica o el empleo de líquidos iónicos, fluidos supercríticos o materiales nanométricos son frecuentes en la búsqueda de transformaciones químicas que cumplan los principios de la química verde.

3.4. Intensificación de procesos

Ramshaw, uno de los pioneros en este campo, definió la intensificación de procesos como una estrategia para conseguir reducciones considerables del tamaño de una planta química alcanzando un objetivo de producción fijado. Esta propuesta inicial ha ido evolucionando para transformarse en la concepción actual de la intensificación de procesos: desarrollo de equipos innovadores y diseño de nuevos procesos que van a producir mejoras sustanciales en los procedimiento químicos o en otro tipo de procesos de fabricación, tales como la disminución de los costes, tamaño del equipo, consumo energético, generación de residuos, y mejora del control remoto, de flujos de información y de la flexibilidad del proceso (Ref. 8 y 9).

En estos últimos años están surgiendo equipos de elevada eficiencia que permiten cambiar de forma espectacular el tamaño y los costes de las plantas químicas. Estas tecnologías son muy adecuadas para efectuar reacciones muy exotérmicas y velocidades de reacción muy altas. Con microrreactores formados por pequeños canales, entre 0,01 y 01 mm, se facilita la mezcla de las moléculas de los diferentes productos, reactivos, catalizador, disolvente, que se alimentan al reactor al reducirse las distancias que deben recorrer y se favorece la eliminación de calor al ser menor el volumen que hay que enfriar y al aumentar la superficie disponible para el intercambio de calor. Gran parte de los procesos químicos de interés industrial transcurren mediante un esquema de reacciones en el que cada una de ellas tiene un determinado comportamiento termodinámico y cinético. Las características de los microrreactores permiten llevar a cabo el proceso de fabricación en condiciones muy similares a las condiciones que pueden deducirse del esquema de reacción para hacer máximo el rendimiento del producto buscado. De este modo se reduce significativamente la formación de subproductos y residuos, el consumo de reactivos, se simplifican las costosas operaciones de separación y purificación, se puede evitar la recirculación de reactivos no transformados, aumenta la seguridad del proceso, disminuye la cantidad de sustancias peligrosas a emplear, disminuye el tamaño de la planta y en consecuencia la obra civil necesaria, etc.

3.5. Aplicaciones de la estrategia de sostenibilidad

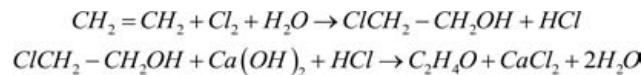
En una reacción química se ponen en contacto los reactantes, se mantienen en unas determinadas condiciones —presión, temperatura, catalizador— durante el tiempo necesario para alcanzar el nivel de la transformación deseado. Al haber un gran número de variables son también muchas las decisiones que se deben tomar para disponer del producto que se quiere obtener. La estrategia de sostenibilidad implica tomar estas decisiones en función del conocimiento científico-tecnológico y de la combinación de factores económicos, ambientales y sociales.

No es posible lograr, en la mayoría de las reacciones químicas, conversiones completas de los reactantes ni rendimientos a los productos deseados del 100% debido a limitaciones termodinámicas y a la

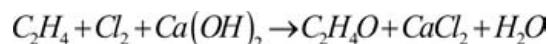
presencia de reacciones competitivas. Para aumentar la especificidad química es preciso acelerar las reacciones que conducen al producto principal y frenar las reacciones no deseadas, aquellas que conducen a los productos secundarios. Cuando una parte significativa de los átomos contenidos en las moléculas reactantes no acaban formando parte del producto es posible diseñar un método de síntesis diferente que utilice como reactivos moléculas que sólo contengan los átomos que constituyen el producto. La eficiencia química se basa en la capacidad de encontrar procedimientos de síntesis en los que los átomos que participan en la reacción puedan transformarse en el producto. En muchos casos no es posible llevar a cabo estas deseables rutas de fabricación de productos por lo que es necesario recurrir a otros reactantes cuyos átomos, por la propia constitución de las moléculas, no pueden acabar formando parte del producto.

Especificidad y eficiencia son dos objetivos fundamentales de los procedimientos de fabricación de productos químicos. Un ejemplo clásico que ilustra la diferencia de la Utilización Atómica, parámetro que permite cuantificar la producción de residuos de un proceso químico, es la fabricación de óxido de etileno mediante las siguientes rutas:

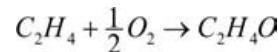
Transformaciones en la ruta no catalítica:



Siendo la reacción global:



Transformaciones en la ruta catalítica:

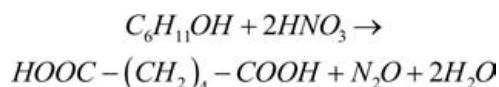


En la primera ruta se necesitan 173 gramos de reactivos para obtener 44 de gramos de óxido de etileno, obteniéndose 111 gramos de cloruro de calcio y 18 de agua. Por tanto la Utilización Atómica de esta ruta es del 25% (44/173). El 75% de los átomos puestos en juego acaban formando parte de otros productos, subproductos de la reacción.

La ruta catalítica tiene una Utilización Atómica del 100% porque para obtener 44 gramos de óxido de

etileno se necesitan de 28 gramos de etileno y 16 de oxígeno. Cuando se lleva a cabo esta reacción se encuentra que aparecen reacciones secundarias como la combustión completa a dióxido de carbono haciendo que parte del etileno no acabe formando parte del óxido de etileno lo que hace que la Utilización Atómica Efectiva no sea del 100%. La especificidad de la reacción depende de la capacidad del catalizador para favorecer el camino deseado y dificultar el que conduce a productos secundarios. Por tanto, una vez seleccionada la ruta que permite conseguir un elevado valor de la Utilización Atómica es preciso encontrar la forma, normalmente un sistema catalítico, de efectuarla con la máxima especificidad. Si esto no es posible, la fabricación del producto debe realizarse con una ruta menos eficiente como ocurre con la obtención de otros epóxidos diferentes al óxido de etileno.

Cuando no se logra prevenir la formación de productos residuales, eligiendo los reactivos que permiten hacer máxima la Utilización Atómica, se puede reducir la pérdida de eficiencia atómica convirtiendo económicamente los productos residuales en productos útiles. Tanto en las refinerías de petróleo como en las diferentes industrias químicas se ha aplicado sistemáticamente este procedimiento. El ácido adípico se obtiene por oxidación de ciclohexanol con ácido nítrico formándose N₂O como producto secundario (coproducto de la reacción):



La empresa Monsanto ha desarrollado un proceso que utiliza el N₂O formado en este proceso para transformar benceno en fenol con lo cual, el subproducto procedente de la fabricación de adípico se emplea como reactivo para fabricar fenol.

Con bastante frecuencia tanto la industria química como la petroleoquímica han utilizado productos químicos peligrosos para realizar las transformaciones. El empleo de reactivos y catalizadores menos peligrosos es otro objetivo de los métodos de síntesis que puede ilustrarse con los siguientes ejemplos.

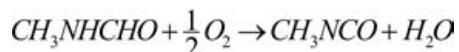
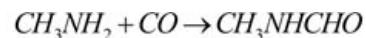
Mediante la alquilación se transforman los gases ligeros de refinería en los combustibles líquidos que demandan distintos tipos de motores. El catalizador

convencional para llevar a cabo la reacción entre olefinas para obtener hidrocarburos ramificados es fluoruro de hidrógeno. La sustitución de HF, compuesto químico peligroso, puede realizarse cuando se dispone de otro catalizador que permite conducir estas reacciones de forma similar, es decir con velocidades de reacción razonables y selectividades similares.

En la manufactura de productos químicos agrícolas se utiliza como reactivo intermedio metilisocianato. Este compuesto se obtiene por reacción entre metilamina y fosgено:



El accidente de Bhopal es un ejemplo de las consecuencias que pueden derivarse de emplear productos químicos peligrosos en la fabricación de productos químicos. La síntesis de metilisocianato puede realizar sin emplear fosgeno si se recurre a un proceso alternativo como:



que puede efectuarse si se dispone de un catalizador apropiado para efectuar la deshidrogenación oxidativa.

Los objetivos de los métodos de síntesis no se limitan a los indicados anteriormente con los correspondientes ejemplos. Otros objetivos son: condiciones de operación más suaves y seguras, eliminación y sustitución de disolventes, utilización de materias primas renovables y disminución del tiempo necesario para lograr la transformación.

4. CONCLUSIÓN

El desarrollo industrial derivado del progreso científico ha producido unos beneficios materiales a la humanidad que son indiscutibles. Baste considerar que en el siglo XX la esperanza de vida en los países desarrollados ha pasado de 50 a 80 años. La química ha contribuido decisivamente a mejorar la calidad de vida y bienestar del hombre ideando soluciones en campos tan diferentes como la alimentación, el vestido, la salud, la higiene o la preparación de nuevos materiales para las más sorprendentes aplicaciones. Pero no es

menos cierto que todo este desarrollo se ha producido con un coste medioambiental muy alto y que la industria química es la que ha liberado mayor cantidad y variedad de sustancias tóxicas, siendo sus profesionales los que han tenido la participación más activa en la búsqueda de soluciones a los problemas ambientales.

Lograr que un número de personas cada vez mayor disfruten de una calidad de vida elevada, sin que este logro degrade significativamente el planeta, es un reto que impone el desarrollo sostenible a la sociedad, la ciencia, la tecnología y la industria. Es responsabilidad de la química y de su industria servir al interés público aportando los productos necesarios para satisfacer sus necesidades y anticiparse a las consecuencias medioambientales de todas sus actividades entendiendo las rutas de exposición, los modos de acceso y los mecanismos de toxicidad en los distintos organismos. La evolución que han seguido los productos y procesos químicos es una demostración de la capacidad de esta ciencia para ir resolviendo los diferentes problemas que han aparecido con productos destinados al mercado y con los procedimientos de fabricación. Las estrategias preventivas y el diseño de productos químicos benignos para el medioambiente deben configurar la forma de entender el trabajo de intercambiar átomos

entre moléculas para aportar los productos que demanda la sociedad.

BIBLIOGRAFÍA

1. G. H. Brundtland, “Nuestro futuro común”, 1987. <http://www.un-documents.net/wcde-ofc.html>
2. T. K. Derry y T. I. Williams, “Historia de la tecnología. Desde 1750 hasta 1900 (II)” Tomo 3. Ed.: Siglo XXI de España Editores S.A. 1990.
3. R. Carson, “Silent Spring”, Ed.: Houghton Mifflin. Boston, 1962
4. FEIQUE. “¿Qué es Responsable Care?” <http://www.feique.org>
5. Reglamento REACH. Diario Oficial de la Unión Europea (DOUE) L-396 de 30 de septiembre de 2006 y DOUE L-136 de 25 de mayo de 2007
6. P. T. Anastas y J. C. Warner, “Green Chemistry: Theory and practice” Oxford University Press, 2000
7. M. Lancaster, “Green Chemistry: An Introductory Text” University of York, RSC, 2002
8. C. Ramshaw, 1999. “Process intensification and green chemistry” Green Chemistry, 1(1), G15-G17.
9. J. A. Moulijn et al. 2008. “Process intensification and process systems engineering: a friendly symbiosis” Computers and Chemical Engineering, 32 (1-2), 3-11.