



REFLEXIÓN

Los paradigmas de la ingeniería química: las nuevas fronteras



Reynerio Álvarez-Borroto*, Ullrich Stahl, Elvia V. Cabrera-Maldonado y Marco V. Rosero-Espín

Facultad de Ingeniería Química, Universidad Central del Ecuador, Quito, Ecuador

Recibido el 3 de febrero de 2017; aceptado el 16 de mayo de 2017

Disponible en Internet el 16 de junio de 2017

PALABRAS CLAVE

Paradigma;
Ingeniería química;
Nuevas fronteras;
Educación

KEYWORDS

Paradigm;
Chemical
Engineering;
New frontiers;
Education

Resumen James Wei, profesor del «Department of Chemical Engineering-MIT» empleó el concepto de paradigma en 1988, introducido por T. Kuhn, para caracterizar las etapas evolutivas de la ingeniería química. Wei identificó 3 períodos: el preparadigmático, un primer paradigma que lo relaciona con la publicación del texto *Principles of Chemical Engineering*, y un segundo paradigma asociado al texto: *Transport Phenomena*, de Bird, Stewart and Lightfoot, en 1960. Los paradigmas de Wei son reduccionistas y limitados y deben ser ampliados y actualizados. En el presente trabajo se identifican 3 etapas: el preparadigmático, el paradigma de las operaciones unitarias, y el paradigma de la ciencia de la ingeniería química. Se hace referencia a las nuevas fronteras de la ingeniería química y a la necesidad de incluir nuevas disciplinas académicas y nuevas técnicas de enseñanza-aprendizaje.

© 2017 Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Química. Este es un artículo Open Access bajo la licencia CC BY-NC-ND (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

The paradigms of Chemical Engineering: The new frontiers

Abstract James Wei, a professor at the Department of Chemical Engineering-MIT, used the paradigm concept in 1988, introduced by T. Kuhn, to characterize the steps of evolution of the Chemical Engineering. Wei identified three periods: the pre-paradigmatic, a first paradigm which he relates to the publication of the text 'Principles of Chemical Engineering', and a second paradigm associated with the text: 'Transport Phenomena', by Bird, Stewart and Lightfoot, in 1960. Wei's paradigms are reductionistic as well as limited and need to be expanded and

* Autor para correspondencia.

Correo electrónico: reynerioalvarez2011@gmail.com (R. Álvarez-Borroto).

La revisión por pares es responsabilidad de la Universidad Nacional Autónoma de México.

updated. In this work three steps are identified: the pre-paradigmatic, the paradigm of Unit operations, and the paradigm of the Science of Chemical Engineering. Reference is made to the new frontiers of Chemical Engineering and to the requirement to include new academic disciplines and new techniques of teaching and learning.

© 2017 Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Química. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

Introducción

El «American Institute of Chemical Engineers» (AIChE) define: «Ingeniería Química es la profesión en la cual el conocimiento de la matemática, química y otras ciencias básicas son adquiridas por el estudio, la experiencia y la práctica, es aplicado con juicio para desarrollar maneras económicas de usar materiales y energía para el beneficio de la humanidad». Esta ambigua definición no ha cambiado desde que se fundó el AIChE, en 1908, y habla de la gran versatilidad y del enorme campo de acción del ingeniero químico, que se amplía constantemente (American Institute of Chemical Engineers, 2016).

El surgimiento y desarrollo de la ingeniería química han sido objeto de diversos estudios (Kim, 2002; Aiello, Marmol y Sánchez de Puertas, 2012; Mascone, 1999; Márquez et al., 2016). Con fines referenciales, el nacimiento de la ingeniería química se puede situar en 1888, en Estados Unidos, a pesar de que en Alemania la química había alcanzado un mayor desarrollo (Auyang, 2003). En esta etapa el ingeniero químico consistía en un ingeniero mecánico con algunos créditos de química, o un ingeniero de planta con una larga experiencia pero de escasa preparación teórica, o un químico práctico con conocimientos de reactores industriales.

George E. Davis (1850-1906) es considerado el padre de la ingeniería química; trató de crear la primera organización de ingenieros químicos en 1880, y en 1887 sintetizó sus experiencias en la industria química en una serie de 12 materiales escritos que presentó en la «Manchester Technical School» (Chemical Heritage Foundation, 2016). Este material es considerado el primer curso de ingeniería química y explica las operaciones individuales que tienen lugar en un proceso, que posteriormente se denominaron operaciones unitarias. En 1923 se publicó la importante obra: *Principles of Chemical Engineering*, de Walker, Lewis y Mc Adams, que sentó las bases modernas de la profesión (History of Chemical Engineering at MIT, 2016).

Importancia de la industria de procesos químicos

La industria de procesos químicos (CPI, por sus siglas en inglés) es uno de los más importantes sectores de la industria moderna. Produce más de 70,000 productos, cuya venta anual asciende a US\$2.4 trillones, que representa el 4% de la economía mundial (Halima, Carvalho, Srinivasana, Matos y Gani, 2011). China y Estados

Unidos son los mayores productores a nivel mundial (Bilbao, 2015).

Los paradigmas de Wei

La «National Academy Press» publicó el reporte: «*Frontiers in Chemical Engineering: Research Needs and Opportunities*» (National Academy Press, 1988), a partir del cual el profesor James Wei presentó el trabajo «*Frontiers of Chemical Engineering*» (Wei, 1988), en el cual distingue 3 periodos en el desarrollo de la ingeniería química: un preparadigmático y 2 paradigmas. El primer paradigma, el autor lo relaciona con la publicación del texto *Principles of Chemical Engineering* y el segundo paradigma lo asocia con el texto: *Transport Phenomena*, de Bird, Stewart and Lightfoot, en 1960.

Los paradigmas descritos por Wei son limitados, reduccionistas, imprecisos e incompletos. Cada paradigma lo relaciona con la publicación de un texto específico en Estados Unidos e ignora los aspectos históricos que condujeron al establecimiento de la ingeniería química como profesión.

El concepto de paradigma de Kuhn

Thomas S. Kuhn (1922-1996) introdujo el concepto de paradigma (Kuhn, 2005). Según Kuhn, el paradigma es un concepto globalizador que comprende todos los compromisos compartidos por la comunidad científica. Implica la aceptación de un mismo enfoque en la resolución de diversos problemas relacionados con un área del saber, que se consideran como subconjuntos de un mismo paradigma. La etapa precientífica, que antecede a la «ciencia normal», se caracteriza por una serie de enfoques que aún no son ciencia, porque no tienen un paradigma común. La ciencia normal es un paradigma que prevalece como principal forma de trabajo científico durante un tiempo determinado. Pero los avances científicos, que suceden ininterrumpidamente, llegado el momento, rompen con el paradigma establecido y surge la ciencia revolucionaria. La ciencia revolucionaria es aquella que rompe radicalmente con el paradigma establecido (de ciencia normal) para propiciar un salto radical, cualitativamente superior.

Las fronteras de las ciencias son el nuevo universo de los estudios de investigación en el cual se enfoca la educación, la interacción con nuevos paradigmas de otras carreras, que complementan, requieren o potencializan a la ingeniería química e impulsan cambios radicales. Esta nueva interacción crea escenarios generando paradigmas que antes no

existían. La creación de estos nuevos escenarios crea nuevas ventajas competitivas en el mundo de los negocios.

Cussler y Wei (2003), en «*Chemical product engineering*» (AIChE J.), muestran el crecimiento de los productos de la industria química; en ellos se visualiza el crecimiento sostenido de los combustibles y los bioproductos. En el primer caso, la tendencia estará dada por un acercamiento entre la mecánica de los automóviles y la química de sus combustibles, y en el segundo, se requerirá fusionar las ciencias de la ingeniería de la química con la biología.

La importancia de los elementos de la educación

Entre las competencias intelectuales básicas están: percibir realidad apreciando tamaños, direcciones y relaciones espaciales; reproducir mentalmente objetos que se han observado; reconocer el mismo objeto en diferentes perspectivas (la imagen queda tan fija que el individuo es capaz de identificarla, independientemente del lugar, posición o situación en que el objeto se encuentre); anticiparse a las consecuencias de cambios espaciales, y adelantarse e imaginar suponer cómo puede variar un objeto que sufre algún tipo de cambio; describir coincidencias o similitudes entre objetos que lucen distintos; identificar aspectos comunes o diferentes en los objetos que se encuentran alrededor del individuo, y tener un sentido común de la dirección.

«Una de las competencias que el Ingeniero Químico debe tener está relacionada con la llamada inteligencia viso-espacial, ya que los profesionales en esta materia deben interpretar y crear planos, leer e interpretar datos gráficos, diseñar equipos y plantas, entender la conexión espacial que hay entre los diferentes equipos de un proceso, etc.

La inteligencia espacial corresponde a una de las inteligencias del modelo propuesto por Howard Gardner en la teoría de las inteligencias múltiples.

La inteligencia viso-espacial es considerada como la habilidad de pensar y percibir el mundo en imágenes, se piensa en imágenes tridimensionales y se transforma la experiencia visual a través de la imaginación. Además, permite percibir imágenes externas e internas, recrearlas, transformarlas o modificarlas y decodificar información gráfica» (Galdeano y Valiente, 2014).

La inteligencia visual en la ingeniería química se relaciona con la capacidad de interpretar las dimensiones y la colocación de los equipos en la distribución de estos en planta y permitir las consideraciones necesarias de mantenimiento.

La pirámide del estadounidense Edgar Dale establece un cono sobre la experiencia (Dale, 1969); en esta, la distribución de los ámbitos de las experiencias-aprendizaje establece las contribuciones de la instrucción visual en el área de la educación. Estas habilidades, en las que se puede ver de forma general un 20% para el aprendizaje visual, permiten mostrar la importancia de la visualización de los procesos industriales en la enseñanza de las ingenierías.

Los paradigmas actuales de la ingeniería química

En el devenir histórico de la CPI los autores del presente trabajo distinguen 3 etapas: 1) la etapa precientífica, que se caracterizó por el empleo de técnicas aleatorias, y técnicas sistemáticas; 2) el paradigma de las operaciones unitarias; y 3) el paradigma de la ciencia de la ingeniería química. Adicional, se da una visión del futuro impacto de la inteligencia artificial en la ingeniería química y su arista sustentable.

La etapa precientífica

La etapa precientífica de la CPI está estructurada en 2 subconjuntos: las técnicas aleatorias y las técnicas sistemáticas. El primer subconjunto se caracterizó por la aplicación de técnicas fortuitas; sin seguir un procedimiento preestablecido. Un punto de referencia se puede situar en la Edad del Bronce (~3,500 años a.C.), cuando el hombre logró la fundición del cobre con estaño para la obtención de bronce, y fabricó muchos otros productos. En esta fase inicial el hombre ejerce su acción sobre la naturaleza más inmediata de una forma aleatoria. Posteriormente, el hombre adquirió la capacidad de realizar actividades dirigidas al logro de fines elegidos por él. Comienza la etapa de hacer por imitación, primer recurso para la transmisión del conocimiento, mecanismo que aun actualmente tiene vigencia en muchos oficios.

El segundo subconjunto de la etapa precientífica de la CPI comienza con la química industrial, que abarca desde finales del siglo XVIII hasta 1915, iniciado con la revolución industrial en Inglaterra. El decisivo acontecimiento de la época fue el perfeccionamiento de la máquina de vapor por James Watt (1736-1819).

En los siglos XVII y XVIII nace la química como ciencia. Robert Boyle (1627-1691) es considerado el primer químico moderno. Con el descubrimiento de las leyes de conservación de la masa y la energía, y de la química se establecieron los fundamentos para el desarrollo de las herramientas básicas de la ingeniería química (Selected classic papers from the History of Chemistry, 2016).

En la etapa de la química industrial, los procesos químicos seguían típicos procedimientos de escalado lineal de los realizados en laboratorio; es decir, adaptar procesos de laboratorio a gran escala. Es el subconjunto de la técnica sistemática del período precientífico. Mediante el empleo de la técnica sistemática se construyeron grandes fábricas, principalmente de ácido sulfúrico y álcalis en los años 1800. Las torres de transferencia de masa, desarrolladas por John Glover para la recuperación del nitrato en la producción de ácido sulfúrico, fue el aspecto predominante de la CPI en el siglo XIX (Kiefer, 2002). Con esta innovación comenzaron a tomar forma los conceptos de reciclaje, protección del medio ambiente y la eficacia de costo en la CPI (Kostick, 2005).

Primer paradigma: las operaciones unitarias

El primer paradigma se inicia con la introducción del concepto de «operación unitaria», en 1915, por Arthur D. Little

(TCEtoday, 2011). Los procesos dejaron de estudiarse y diseñarse como un todo, de acuerdo con la práctica de la química industrial, y evolucionaron a través del estudio de sus etapas individuales, científicamente fundamentadas e independientes del tipo de proceso, que se repiten en todos ellos. De esta manera, se identificó con precisión el objeto de estudio de algunas ramas de la ingeniería, que eran motivo de controversias. Así, la ingeniería mecánica se asoció a la maquinaria; la química industrial, al producto; la química aplicada, a las reacciones individuales; y la ingeniería química, a las operaciones unitarias, comunes a todos los procesos químicos.

A mediados de los años 90 del pasado siglo se intensificó el desarrollo de los procesos químicos. Constituye un aporte importante al perfeccionamiento de la CPI; pero, dentro del primer paradigma. Su inicio se puede situar en 1995, con la celebración de la *1st International Conference on Process Intensification in the Chemical Industry*. «La intensificación del proceso es resumida como cualquier desarrollo en Ingeniería Química que sea sustancialmente más pequeño, más limpio y más eficiente energéticamente (Stankiewicz y Moulijn, 2000).

El modelo económico de alto consumo como herramienta de generación de riqueza no contempló las particularidades de un sistema finito como el planeta. Este modelo necesita evolucionar y reconsiderar la dinámica de producción actual.

Uno de los avances más significativos en esta línea es su implementación en la enseñanza de la química sustentable para el desarrollo de los procesos de la ingeniería verde.

La recirculación total, concepto que parte del principio de conservación de masa a través del balance de materia, complementada por los principios de la química verde, impulsa la búsqueda de soluciones a los procesos químicos, y en esa búsqueda es donde tienen aplicación los principios de la química verde. Esta novedosa y revolucionaria forma de enfocar la síntesis de sustancias químicas es totalmente aplicable a los procesos de la ingeniería química.

Segundo paradigma: ciencia de la ingeniería química

El segundo paradigma se identifica con la ciencia de la ingeniería química. La ciencia está dirigida a investigar «qué es» y predecir lo «que puede ser». Las ciencias de la ingeniería comprenden, además, otros propósitos relacionados con su aplicación: «para qué» «cómo», y «cuán bueno». Las ciencias de la ingeniería estudian los mecanismos subyacentes y las funciones del sistema productivo (Engineering Sciences, 2016). Se relaciona estrechamente con la técnica del desarrollo, en la que el objeto técnico tradicional ha sido desplazado por complejos procesos. Se asocia al nacimiento de nuevas áreas científicas a escala molecular y celular.

La «American Society for Engineering Education» identificó 6 ciencias de la ingeniería. Las ciencias de la ingeniería implican la multidisciplinariedad y la transdisciplinariedad para el estudio de un objeto. La descripción del objeto o fenómeno en estudio, a través de los aportes de varias

ciencias, es más que la suma de sus partes. Constituye un enfoque más holístico, establece interfaces, concilia diferentes aproximaciones y enriquece el conocimiento acerca de dicho objeto. «[...] los conceptos de la ciencia son nudos en una red de interrelaciones sistemáticas en la que las leyes y los principios teóricos constituyen los hilos [...] Cuantos más hilos converjan o partan de un nudo conceptual, tanto más importante será su papel sistematizador o su alcance sistémico» (UNESCO, 2016).

A través de la síntesis de la física, la química, la matemática, la biología y otras ciencias básicas, la ingeniería química creó un cuerpo de conocimientos científicos, que asociado al desarrollo actual de la ciencia, ha propiciado el estudio y desarrollo de objetos y fenómenos a escala molecular mediante la incorporación de otras disciplinas científicas de avanzada. Estos estudios a escala molecular permiten la obtención de una gran diversidad de productos de alto valor agregado (AVA). Así, la ciencia de la ingeniería química abarca la interfaz entre las ciencias moleculares y la ingeniería para la obtención de diversos productos a gran escala y el desarrollo del proceso.

Desde los años 50, la ingeniería química ha estado involucrada en el estudio de complejos fenómenos biológicos, como las nuevas técnicas de liberación de drogas (AIChE, 2009; Creating technology, 2016). En un futuro próximo, la nanomedicina, uno de cuyos propósitos es el diseño de nanosistemas de liberación de fármacos, debe sustituir las terapias convencionales por las nanoterapias (Rojas, Aguado y González, 2016).

Actualmente se desarrolla la cuarta revolución industrial (Industria 4.0) (Hermann, Pentek y Otto, 2016), considerada como la ciberindustria del futuro, que tiene como fin la automatización total y optimización de los procesos industriales. A pesar de ser una realidad incipiente y emergente, es un hito en el desarrollo industrial que marcará importantes cambios sociales en un futuro próximo, haciendo uso intensivo de las redes tecnológicas, desarrollando las industriales inteligentes y sostenibles.

Un paso más allá de la Industria 4.0, la singularidad planteada por John von Neumann, y plasmada por Ray Kurzweil, establece el automejoramiento de una tecnología, en otras palabras, el rediseño por sí misma de los sistemas y redes de esa tecnología (Sandler, 2014). Si pensamos en la influencia actual que los sistemas informáticos y las redes tienen sobre el control de los procesos químicos de una tecnología cualquiera, sería inadecuado pensar que la influencia de este control no transmitirá sus cambios al proceso. Kurzweil crea un punto de vista de cambio exponencial de la tecnología, mostrando que los avances tecnológicos serán cada vez más radicales, evidenciando, no un aumento de velocidad como se ha estimado hasta ahora, sino una mayor aceleración que generará mayores cambios tecnológicos que la del siglo xx.

Sobre la base anterior es necesario que el proceso de enseñanza de la ingeniería química y sus afines incluya con mayor peso el manejo de lenguajes de programación e instrumentación dirigidos al entendimiento del control de procesos para preparar el advenimiento de la inteligencia artificial. Esta aceleración transformará la industria de los productos químicos creando nuevas metodologías, y ellas generarán una nueva cultura tecnológica.

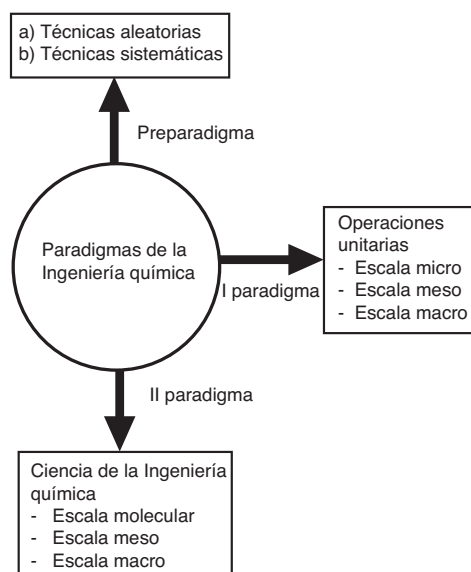


Figura 1 Paradigmas de la ingeniería química con sus respectivas escalas.

Los productos de alto valor agregado

Los productos AVA se caracterizan por su alto «contenido» de conocimiento. De acuerdo con los economistas clásicos, el valor más «puro» de un objeto radica en el trabajo realizado sobre él: «Un valor de uso, un bien, solo encierra un valor por ser encarnación o materialización del trabajo humano abstracto. ¿Cómo se mide la magnitud de ese valor? Por la cantidad de sustancia creadora de valor, es decir, de trabajo, que encierra» (Guerrero, 2004). En los productos AVA el contenido fundamental es el conocimiento que encierra, como parte del trabajo abstracto realizado en su elaboración.

En la figura 1 se sintetizan los aspectos fundamentales de la etapa preparadigmática y los paradigmas de la ingeniería química.

Consideraciones generales

La CPI tradicional constituye un sistema estable e integrado de producción con sinergia propia, cuya base está constituida por 10 materias primas fundamentales, a partir de las cuales se obtienen más de 70,000 productos finales, fundamentalmente a través de la síntesis química. No se prevé un cambio dramático en su estructura productiva en los próximos años, aunque la bioingeniería comienza a impactar su desarrollo (Clomburg, Crumbley y González, 2017).

El primer paradigma opera en 3 escalas: micro, para la investigación y desarrollo; meso, para el diseño de equipos; y macro, para el diseño del proceso.

El paradigma de la ciencia de la ingeniería química opera a 3 escalas: molecular (micro y nano), meso y macro. Para el estudio del objeto a nivel micro se basa en ciencias de avanzada como la ingeniería genética, las nanociencias, la termodinámica molecular, la biología molecular, la bioingeniería, la mecánica estadística, etc.

La formación del ingeniero químico debe incluir el enfoque tradicional, la visión de las nuevas fronteras de la profesión y la aplicación de nuevas técnicas y métodos de

enseñanza-aprendizaje (Díaz y Hernández, 2002), como la implementación de la inteligencia espacial a través de la visualización de los procesos mediante herramientas asistidas por computador, con enfoque en los principios de la ingeniería de procesos verdes, sin descuidar el conocimiento de los avances informáticos dirigidos a la industria inteligente.

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.

Referencias

- Aiello, C., Mármol, Z. y Sánchez de Puertas, A. (2012). Ingeniería química: historia y evolución. *Revista Tecnocientífica URU*, (2), 51–59 [consultado 14 Ene 2017]. Disponible en: <http://www.uru.edu/fondoeditorial/revista/pdf/rtu/TCUn2/RTCUn2-%20ingenieriaquimica.pdf>
- American Institute of Chemical Engineers (AIChE) (2016). Constitution [consultado 29 Dic 2016]. Disponible en: <http://www.aiche.org/about/governance/constitution>
- American Institute of Chemical Engineers (AIChE) (2009). Chemical engineers in the biomedical field: From discoveries to solutions [consultado 01 Jun 2017]. Disponible en: <http://studylib.net/doc/10322128/chemical-engineers-in-the-biomedical-field-from-discover>
- Auyang, S. Y. (2003). Why did chemical engineering emerge in America instead of Germany? Second part [consultado 29 Dic 2016]. Disponible en: URL <http://www.creatingtechnology.org/eng/chemE.pdf>
- Bilbao, M. (2015). La industria química en Alemania: una visión general. Exportación e inversiones. [consultado 29 Dic 2016]. Disponible en: <http://www.icex.es/icex/es/navegacion-principal/todos-nuestros-servicios/informacion-de-mercados/paises/navegacion-principal/el-mercado/estudios-informes/DOC2015416292.html?idPais=DE>
- Chemical Heritage Foundation (2016) [consultado 30 Dic 2016]. Disponible en: <https://www.chemheritage.org/historical-profile/george-e-davis>
- Clomburg, J. M., Crumbley, A. M. y González, R. (2017). Industrial biomanufacturing: The future of chemical production. *Science*, 355(6320) [consultado 31 Ene 2017]. Disponible en: <http://science.sciencemag.org/content/355/6320/aag0804>
- Creating technology: Engineering and biomedicine (2016) [consultado 29 Dic 2016]. Disponible en: <http://www.creatingtechnology.org/index.html>
- Cussler, E. y Wei, J. (2003). Chemical product engineering. *AIChE Journal.*, 49(5), 1072–1075.
- Dale, E. L. (1969). *Audiovisual methods in teaching*. New York: Dryden Press.
- Díaz, F. y Hernández, G. (2002). *Estrategias docentes para un aprendizaje significativo* (2.ª ed.). McGraw-Hill Interamericana.
- Engineering Sciences (2016) [consultado 30 Dic 2016]. Disponible en: <http://www.creatingtechnology.org/science.htm#phy>
- Galdeano, C. y Valiente, A. (2014). Habilidades especiales y competencias en la Ingeniería Química. *Educación Química*, 25(2), 154–158.
- Guerrero, D. (2004). *Historia del pensamiento económico heterodoxo*. pp. 5. [consultado 11 Ene 2017]. Disponible en: <http://www.eumed.net/cursecon/libreria/2004/dg-hpeh/dg-hpeh.htm>
- Halima, I., Carvalho, A., Srinivasana, R., Matos, H. A. y Gani, R. (2011). A combined heuristic and indicator-based methodology

- for design of sustainable chemical process plants. *Computers and Chemical Engineering*, 35(8), 1343–1358.
- Hermann, M., Pentek, T. y Otto, B. (2016). *49th Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS)*.
- History of Chemical Engineering at MIT (2016) [consultado 28 Dic 2016]. Disponible en: <http://web.mit.edu/cheme/about/history.html>
- Kiefer, D. M. (2002). It all about alkalis. *Today's Chemist at Work*, 11(1), 45–46, 49. [consultado 31 Ene 2017]. Disponible en: <http://pubs.acs.org/subscribe/archive/tcaw/11/i01/html/01chemchron.html>
- Kim, I. (2002). An evolution in chemical engineering. *Chemical Engineering Progress* [consultado 29 Dic 2016]. Disponible en: <http://people.clarkson.edu/~wwilcox/Design/evolvche.pdf>
- Kostick, D. S. (2005). Soda ash. US Geological survey — minerals information [consultado 31 Ene 2017]. Disponible en: https://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/soda_ash/610496.pdf
- Kuhn, T. (2005). *La estructura de las revoluciones científicas*. España: Fondo de Cultura Económica de España [consultado 28 Dic 2016]. Disponible en: http://uba.wiki/La_estructura_de_las_revoluciones_cient%C3%ADficas
- Márquez, R., Tolosa, L., Gómez, R., Izaguirre, C., Rennola, L., Bullón, J., et al. (2016). Reproducción de un ambiente de innovación en el salón de clase. Una estrategia para promover la creatividad en la educación en Ingeniería Química. *Educación Química*, 27(4), 249–256.
- Mascone, C. (1999). Engineering the next millennium. *Chemical Engineering Progress*, 95(10), 102–112.
- National Academy Press (1988). *Frontiers in Chemical Engineering: Research Needs and Opportunities* [consultado 28 Dic 2016]. Disponible en: <http://www.nap.edu/catalog/1095.html>
- Rojas, Y., Aguado, K. y González, I. (2016). La nanomedicina y los sistemas de liberación de fármacos: ¿la revolución de la terapia contra el cáncer? *Educación Química*, 27, 286–291.
- Sandler, R. (Ed.). (2014). *Ethics and emerging technologies*. UK: Palgrave Macmillan.
- Selected classic papers from the History of Chemistry (2016) [consultado 29 Dic 2016]. Disponible en: <http://web.lemoyne.edu/~giunta/papers.html>
- Stankiewicz, A. y Moulijn, J. (2000). Process intensification: Transforming Chemical Engineering. *Chemical Engineering Progress* [consultado 30 Dic 2016]. Disponible en: <http://www.rvo.nl/sites/default/files/2013/10/Process%20Intensification%20Transforming%20Chemical%20Engineering.pdf>
- TCEtoday (2011). [Consultado 01 Jun 2017]. Disponible en: <http://www.tcetoday.com/~media/Documents/TCE/Articles/2011/841/841cewctw.pdf>
- UNESCO (2016). Science report towards 2030 [consultado 29 Dic 2016]. Disponible en: <http://unesdoc.unesco.org/images/0023/002354/235406e.pdf>
- Wei, J. (1988). *Frontiers of Chemical Engineering*. I.Chem.E. Symposium Series (110) [consultado 30 Dic 2016]. Disponible en: <http://docplayer.net/16369263-I-chem-e-symposium-series-no-110.html>