

CRITERIOS DE SELECCIÓN DE REACCIONES QUÍMICAS EN UN BANCO DE REACTORES DE PLANTA PILOTO

CHEMICAL REACTIONS SELECTION CRITERIA FOR PILOT PLANT REACTORS

Francisco Javier González Chaves*
Elizabeth Mora Quiroz**

Recibido: 30 de julio de 2018

Aceptado: 5 de diciembre de 2018

Resumen

El artículo propone ocho criterios para la selección de reacciones químicas para un banco de reactores de planta piloto, el cual tiene como propósito la educación universitaria. Este estudio considera los siguientes criterios: resistencia a la corrosión del material, consideraciones de seguridad para la manipulación de los reactivos, medición del grado de avance de la reacción, disposición de residuos, interés académico, interés industrial, interés en investigación de las reacciones y precio de experimentación. Con base en estos parámetros se sugieren las reacciones de saponificación de acetato de etilo, la hidrólisis de anhídrido acético y la descomposición de alcohol diacetona para un banco de reactores de acero inoxidable 304.

Palabras clave: acero 304, criterios de selección, planta piloto, reacciones químicas, reactores.

Abstract

A set of criteria for chemical reactions selection for pilot plant reactors, made in 304 stainless steel, used for university education, is proposed. It tackles an overall revision for the 304 stainless steel corrosion resistance, security regards for substance manipulation, waste management and disposal, the measurement of the course of the reaction, the reactions academical, industrial and research interest, as well as the experimental price. It was selected a set of chemical reactions feasible to run in the 304 stainless steel pilot plant reactors, regarding the criteria. Ethyl acetate saponification, acetic anhydride hydrolysis, and diacetone alcohol decomposition were the selected reactions.

Keywords: selection criteria, chemical reactions, reactor, pilot plant, 304 stainless steel.

* Estudiante de Ingeniería Química. Grupo de investigación Procesos de Separación no Convencionales (GPS), línea de investigación Procesos de Separación con Reacción, Fundación Universidad América, Bogotá D. C., Colombia. francisco.gonzalez@estudiantes.uamerica.edu.co

**Estudiante de Ingeniería Química. Grupo de investigación Procesos de Separación no Convencionales (GPS), línea de investigación Procesos de Separación con Reacción, Fundación Universidad América, Bogotá D. C., Colombia. elizabeth.mora@estudiantes.uamerica.edu.co

INTRODUCCIÓN

El proceso de escalado de procesos industriales incluye las etapas de laboratorio, banco, planta piloto, planta semiindustrial y planta industrial. Dependiendo de la complejidad y conocimiento de la operación o proceso, se puede o no involucrar todas las etapas (González, 2000). Existen diversos criterios para definir los límites entre una escala y otra, como, por ejemplo, el volumen de los equipos (González, 2000).

Las plantas piloto se emplean dentro de la metodología de escalamiento de procesos industriales, así como se usan como herramientas para la educación universitaria. Según Anaya y Pedroza (2008), una planta piloto consiste en partes específicas ensambladas que operan en conjunto con el propósito de reproducir a escala procesos productivos. En estos procesos de escala reducida se involucran fenómenos simples y/o complejos de interés para la ingeniería; en el caso de la ingeniería química, las plantas piloto permiten profundizar en las interacciones existentes en operaciones como, por ejemplo, la termodinámica, el flujo de fluidos, la transferencia de masa y energía, las reacciones químicas, la biotecnología, el control de procesos, entre otras. En la industria química, las plantas piloto preceden a una planta de producción a escala completa que no se ha construido, o son una reproducción de una planta de producción existente (González, 2000).

A nivel industrial, experimentar con una planta piloto tiene dos objetivos: a) predecir el comportamiento de un proceso determinado a nivel industrial, operando a condiciones similares a las esperadas, para obtener datos importantes en el diseño de la planta a escala industrial; b) reproducir una planta industrial ya existente con el fin de realizar análisis de sensibilidad de manera más económica y rápida (Anaya y Pedroza, 2008). Una planta piloto de procesos químicos puede contar con unidades de separación, como torres de destilación, trenes de evaporadores, unidades de secado, absorción y adsorción, así como con unidades de transformación, por ejemplo, un reactor o banco de reactores. Los reactores en planta piloto son utilizados para obtener información preliminar de un proceso con respecto a la velocidad a la que ocurre, la disposición de residuos, la resistencia química del material de construcción, la ejecución de los sistemas de control, etc. (González, 2000).

En el caso en que la planta piloto se disponga para fines educativos, en un principio no es claro cuáles procesos se deben aplicar, porque no se pretende escalar un proceso determinado, ni representar una planta de producción existente. Entre los propósitos de una planta piloto está la implementación de procesos relacionados con conceptos y algoritmos que se enseñen en una asignatura determinada. Se pueden seleccionar numerosos procesos con base en este criterio; sin embargo, deben considerarse factores que estén relacionados con la resistencia química del material de construcción, el manejo y disposición de residuos, el manejo de los reactivos y productos, el interés del proceso a nivel académico, industrial e investigativo, el precio de cada corrida y la disponibilidad de los equipos.

El presente artículo propone ocho criterios para la selección de reacciones que se puedan llevar a cabo en un banco de reactores de una planta piloto construida en acero inoxidable 304, cuyo propósito, más que industrial, es educativo.

METODOLOGÍA

Para garantizar la durabilidad y el desempeño de la unidad, la seguridad en el área de experimentación, la disposición adecuada de residuos, la medición del avance de la reacción, la viabilidad económica de una práctica de laboratorio y la factibilidad académica, industrial e investigativa de la reacción de estudio, este artículo propone un conjunto de criterios con los que se pueden seleccionar reacciones químicas, para llevarlas a cabo en prácticas de laboratorio de reactores en una planta piloto de una

institución de educación universitaria. Este análisis tiene como referente de estudio un banco de reactores construido en acero inoxidable 304.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Preselección de reacciones

Se debe llevar a cabo una revisión bibliográfica para seleccionar reacciones químicas. Como el caso de estudio es una planta piloto de reactores, la investigación debe enfocarse en guías de laboratorio de instituciones académicas. La búsqueda se complementa con artículos de investigación o tesis de grado que traten sobre reacciones químicas en reactores de tamaño similar a los disponibles. Las reacciones preseleccionadas deberán estudiarse según el conjunto de criterios expuestos a continuación.

Material de construcción

Se deben considerar las características del material de construcción de la unidad o equipo a estudiar. De la composición, por ejemplo, se obtiene información con respecto al porcentaje de cada componente en el material y la característica que dicho componente le confiere al material. En la tabla 1 se muestra la composición del acero inoxidable 304.

Tabla 1. Composición química de los aceros 304

Componente	Fracción
C	0.08
N	0.10
Cr	18-20
Ni	8.0-10.5
Mn	2.0
Si	1.0
P	0.045
S	0.030

Fuente: adaptado de McGuire (2008).

El carbono y el nitrógeno proporcionan una alta resistencia a esfuerzos mecánicos y corrosión a altas temperaturas (McGuire, 2008). El níquel se emplea junto con el cromo para obtener la tenacidad y ductilidad del níquel y la dureza y resistencia al desgaste del cromo (Construmática, 2018). Además, el cromo en ambientes oxidantes forma una película pasiva de óxido de cromo (Cr_2O_3) que genera una alta resistencia a la corrosión (esta característica es propia de los aceros inoxidables). Componentes como el manganeso y el silicio aumentan la dureza del acero, mientras que el azufre es una impureza que se busca mantener en muy bajas proporciones (CAP, 2000). El carbono y el cromo en un rango de temperaturas de 500 a 900 °C, aproximadamente, pueden reaccionar para formar carburos de cromo; si se transfiere calor o se retira a una velocidad baja (Sanabria, 2017), disminuye el porcentaje de estos componentes en el material, afectando tanto sus propiedades mecánicas como la resistencia a la corrosión.

De esta manera, se empieza a profundizar en las condiciones de operación que soporta el material. Por ejemplo, el acero 304 puede utilizarse para una cantidad determinada de aplicaciones en las que se requiera resistencia a la corrosión y a tensiones por encima de los 500 °C (Mcguire, 2008), evitando bajas velocidades de transferencia de calor. Cabe destacar que existen aceros inoxidable con mayor resistencia a la corrosión y altas temperaturas, como es el caso del acero inoxidable 316. La composición de este último se diferencia de la del acero 304 en que contiene cerca del 2 % de molibdeno, lo que mejora la resistencia a la corrosión (en particular, la corrosión de cloruros) (Chávez, 2014).

Por otro lado, deben revisarse las propiedades físicas y mecánicas para finalizar el reconocimiento de las características del material de construcción. Esta etapa es más útil para los casos en que aún no se ha definido el material, de tal forma que se puede escoger el más adecuado mediante la comparación de las propiedades de distintos materiales.

Resistencia a la corrosión del material

La resistencia a la corrosión de un material depende del medio al cual se exponga. Por ejemplo, no se recomienda usar el acero 304 en aplicaciones en las que se involucren soluciones de ácido sulfúrico, clorhídrico, sulfuroso, fórmico y láctico (Mcguire, 2008).

El ácido sulfúrico únicamente podría utilizarse a temperatura ambiente en soluciones diluidas o como sustancia pura (Alacer Mas, s. f.); la velocidad de corrosión se incrementa con el aumento de la temperatura, así, por ejemplo, la velocidad de corrosión en acero 304 a temperatura ambiente para una solución al 25 % de ácido sulfúrico es de 0.75 mm/año, mientras que a 80 °C la velocidad de corrosión puede ser mayor a 7 mm/año (Kreysa y Schütze, 2008). El ácido clorhídrico ataca la pasividad del material, no siendo factible su utilización ni al 1 % a temperatura ambiente (Mcguire, 2008). El ácido fórmico puede emplearse en muy bajas concentraciones a temperaturas moderadas, por ejemplo, una solución al 10 % a 40 °C; pero para concentraciones mayores, incluso desde temperaturas de 20 °C, el acero 304 no proporciona una buena resistencia a la corrosión para el ácido fórmico (Alacer Mas, s. f.). El ácido láctico puede emplearse a 20 °C en todas las concentraciones (Alacer Mas, s. f.; Camlab, s. f.); sin embargo, desde una temperatura de 40 °C se genera corrosión por picadura (Centro Nacional para el Desarrollo del Acero Inoxidable, s. f.). El ácido sulfuroso causa el mismo efecto, aunque puede ser utilizado únicamente a temperatura ambiente y en cualquier concentración (Alacer Mas, s. f.; Cendi, s. f.).

Una opción para mejorar la resistencia a la corrosión es emplear inhibidores que disminuyan la velocidad de corrosión, como el ácido nítrico. Según la literatura, las mezclas de ácido nítrico con ácido sulfúrico o ácido fosfórico minimizan la acción corrosiva (Mcguire, 2008). Por ejemplo, el acero inoxidable 304 tiene una pérdida de espesor menor a 0.11 mm por año (lo que implica una velocidad de corrosión baja) a temperaturas de 95 °C, para soluciones acuosas de ácido sulfúrico al 70 % con ácido nítrico al 10 %. Para una solución de ácido sulfúrico libre de ácido nítrico, la velocidad de corrosión puede llegar hasta más de 1.1 mm por año (ver tablas de corrosión de Alacer Mas, s. f.).

Por otro parte, el material puede emplearse para soluciones de ácido nítrico, ácido carbónico, ácidos orgánicos, bases débiles y bases fuertes en un rango de temperaturas y concentraciones más amplio (Mcguire, 2008). El ácido nítrico es fuertemente oxidante, lo que favorece la formación de la película pasiva de óxido de cromo; este material es resistente hasta la temperatura de ebullición y concentración máxima de 50 %, mientras que para concentraciones mayores la velocidad de corrosión aumenta, por lo que deja de ser factible para el uso de acero 304 (Alacer Mas, s. f.; Camlab, s. f.). Los ácidos orgánicos, en cuanto tienen una capacidad de disociación débil, generalmente no

son agresivos para los aceros inoxidable, con la excepción de los medios que incluyan iones cloro y altas temperaturas (Mcguire, 2008). Con respecto a las bases fuertes, como el hidróxido de sodio, los aceros inoxidable austeníticos empiezan a sufrir velocidades de corrosión apreciables en soluciones al 50 % desde una temperatura de 105 °C (Cendi, s. f.). Las sales ácidas, como el cloruro de aluminio y cloruro de amonio, pueden hidrolizar para formar soluciones ácidas, lo que acelera el proceso de corrosión por el efecto ácido que ello conlleva, mientras que la presencia de sales alcalinas (que hidrolizan para incrementar el pH de la solución) tienen un efecto positivo, pues disminuyen la tasa de corrosión (Kumar, Kumar, Kumar y Das, 2014). Con respecto a las sales halógenas, las de naturaleza ácida pueden causar corrosión por picado, ya que el ion halógeno penetra la película pasiva si las soluciones son de naturaleza oxidante, o causar un ataque general si las soluciones son reductoras (Cendi, s. f.).

Si se desea conocer el efecto de alguna sustancia en específico sobre algún tipo de material, se recomienda revisar las tablas de corrosión de la literatura, las cuales indican por cada material la velocidad de corrosión en un rango de temperaturas y concentraciones determinado. Por ejemplo, Kreysa y Schütze (2008) establecen que la tasa de corrosión de una solución acuosa al 10 % de ácido sulfúrico a 80 °C es de 7.47 mm/año para el acero 304, mientras que es de 2.92 mm/año para el acero 316.

Manipulación de las sustancias

La revisión de las fichas de datos de seguridad de los compuestos químicos que constituyen las reacciones preseleccionadas forma parte de los criterios para la selección final de reacciones. Así, se identifican los diferentes riesgos y peligros que implica el manejo de la sustancia; igualmente, se revisa recomendaciones y advertencias de seguridad con respecto al almacenamiento, transporte, medidas contra incendios, vertido accidental, condiciones en las que la sustancia es estable o no, así como el equipamiento necesario para protección individual, como gafas de seguridad, guantes, protección respiratoria y ropa químicamente resistente al material. Con base en la información encontrada se puede establecer si la sustancia es químicamente estable bajo las condiciones de almacenamiento existentes, y si su manipulación bajo las consideraciones de seguridad y bajo las limitaciones de la instalación (por ejemplo, si se cuenta con una ventilación adecuada) no representa un peligro para la salud. Las reacciones seleccionadas tienen que estar exentas de generación de subproductos indeseados, como los gases tóxicos. Por ejemplo, la producción de anhídrido acético mediante acetona y ácido acético se da en una reacción múltiple con generación de monóxido de carbono, que es un subproducto indeseado. Por tanto, reacciones de este tipo quedarían descartadas de la selección. La normatividad de seguridad industrial se puede revisar en la Norma Técnica Colombiana 18001 (OHSAS), la cual establece directrices para la prevención de accidentes y enfermedades laborales (Guadalupe, 2017).

Medición del grado de avance de la reacción

Al medir el grado de avance de una reacción se está obteniendo información acerca de como cambian las concentraciones de las sustancias con el tiempo. Como criterio de selección de reacciones, se considera si los métodos de medición son aplicables en la planta piloto existente, con respecto a la disponibilidad de los métodos de medición, los instrumentos de medición y control y los sistemas de toma de muestras.

Para determinar la concentración de una sustancia durante la reacción, puede seguirse cualquier propiedad de la mezcla reaccionante que varíe continuamente durante el transcurso de la reacción (Sykes, 1982). Para reacciones en fase líquida que involucren electrolitos fuertes, el avance de reacción

se determina por seguimiento de la variación de la conductividad de la mezcla. Por tanto, en este tipo de reacciones sería factible disponer de un conductímetro. En caso contrario, deben realizarse titulaciones a las muestras o alícuotas tomadas mientras avanza la reacción. Para conocer la concentración de una solución acuosa de un ácido o base fuerte se emplea una titulación ácido-base; para una solución de una sustancia oxidante o reductora, una titulación redox; para soluciones de cationes de plata, una titulación de precipitación, y para una sal soluble anhidra del catión a analizar, titulaciones complejométricas (Ardila, Tovar y Clavijo, 2011). Por ejemplo, en la saponificación de acetato de etilo reacciona el hidróxido de sodio (electrolito y base fuerte) con el acetato de etilo. A medida que se consume el hidróxido de sodio, la conductividad de la solución disminuirá (Acosta y Pérez, 2012). En consecuencia, se podría disponer de un conductímetro o realizar una titulación ácido-base para seguir el avance de la reacción. Para reacciones en fase gaseosa con cambio en el número de moles totales de la mezcla se requerirá de un manómetro, con el fin realizar lecturas en intervalos de tiempo de la presión total del reactor.

Disposición de residuos

La disposición de residuos se puede manejar con el seguimiento del *Manual de Gestión Integral de Residuos*, del Instituto Nacional de Salud de la República de Colombia (2010). Para la clasificación de los residuos se puede implementar el Decreto 4741 de 2005, en el que se estipulan las características y lista de residuos peligrosos.

Interés académico de la reacción

Uno de los principales intereses académicos sobre una reacción es su ley de velocidad, ya que con esta se estudia el comportamiento de las concentraciones de los reactivos y productos en el tiempo de reacción. Inicialmente, puede realizarse una práctica de laboratorio con el fin de determinar la cinética de una reacción cuya ley de velocidad es conocida, para posteriormente aplicar el algoritmo de análisis de datos obtenidos en un reactor. Los resultados experimentales se comparan con la información de la literatura. En consecuencia, se debe conocer la ley de velocidad de cada reacción seleccionada, lo que en algunos casos implica una laboriosa revisión bibliográfica.

Para reacciones únicas puede compararse el nivel de conversión en dos reactores de flujo (de igual o diferente tamaño) a una temperatura determinada y bajo las mismas condiciones de flujo. Por ejemplo, es posible llevar a cabo la saponificación de acetato de etilo en un reactor continuo de mezcla perfecta (CSTR) de un litro y comparar el nivel de conversión con un reactor tubular (PFR) de un litro. De esta forma puede analizarse los resultados experimentales utilizando la gráfica Levenspiel ($1/-r_A$ vs X_A). Cabe mencionar que, para llevar a cabo dicho análisis, se debe conocer la ley de velocidad de la reacción a la temperatura de operación, o la relación entre la velocidad de reacción y la conversión del reactivo limitante.

Adicionalmente, puede introducirse el concepto de reactores en serie, comparando el nivel de conversión de la saponificación de acetato de etilo en un reactor tubular (PFR) de tres litros, con el nivel de conversión de una secuencia de tres reactores continuos de tanque agitado (CSTR) de un litro de capacidad cada uno.

Para reacciones múltiples se puede aplicar el algoritmo de selección del reactor o configuración de reactores más adecuado para maximizar la concentración de un producto deseado o la selectividad. Para estos casos se debe conocer la ley de velocidad de la reacción principal, así como la ley de las reacciones secundarias. De este modo se da a entender a los estudiantes la razón por la que se utiliza

una configuración determinada de reactores en la práctica de laboratorio. Cabe aclarar que, bajo este enfoque, la selección de estas reacciones está sujeta a la disponibilidad de reactores de la planta piloto y la factibilidad de hacer una configuración determinada de reactores en la instalación, así como al conocimiento de las expresiones de ley de velocidad de cada reacción.

Dentro del conjunto de reacciones seleccionadas, debe haber reacciones limitadas por el equilibrio químico. De este modo se puede determinar las condiciones de operación que favorecen la conversión de equilibrio y aplicarlas en la correspondiente práctica de laboratorio. Igualmente, se puede determinar la ley de velocidad y evaluar la conversión de equilibrio en reactores de flujo, así como establecer la configuración de reactores que maximice la concentración de un producto de interés.

Si las reacciones se llevan a cabo a temperaturas altas, debe revisarse que, bajo esas condiciones, las sustancias involucradas no afecten químicamente el material de construcción y no generen subproductos no deseados (como gases tóxicos). Si la reacción se lleva a altas presiones, se debe garantizar que el equipo pueda resistir estas condiciones. De esta forma se toman medidas de protección a la salud y al medio ambiente.

Interés en investigación de la reacción

Se aplica si la reacción es objeto de estudio en uno de los departamentos de investigación de una institución. En algunos casos pueden seleccionarse reacciones de gran interés industrial de las que se encuentre muy poca información acerca de su ley de velocidad, de tal forma que pueda determinarse su expresión cinética y las condiciones bajo las cuales se produce la mayor cantidad de un producto determinado. Por ejemplo, la saponificación de acetato de etilo es una reacción cuya ley de velocidad y parámetros energéticos, como energía de activación y entalpía de reacción, pueden encontrarse en distintas fuentes bibliográficas; por tal razón, la optimización del proceso es objeto de estudio, pues en esta etapa se realiza un análisis de sensibilidad sobre las variables de operación (temperatura, concentración inicial de reactivos, etc.) para conocer el efecto de las variaciones en el proceso (Acosta y Pérez, 2012).

Interés industrial de la reacción

El interés industrial de una reacción puede estar enfocado en la factibilidad económica del camino de reacción que genera el producto de interés, que se basa en el precio de venta de los productos principales y coproductos, el gasto por las materias primas, el costo de inversión de los equipos, el costo de los servicios de operación y el costo por desecho de subproductos no deseables. Si una reacción no tiene interés para la industria, pero sí interés académico, puede seleccionarse siempre y cuando cumpla con los demás criterios de selección. Por ejemplo, la descomposición de alcohol diacetona en medio básico no tiene interés industrial, ya que la producción mayoritaria de acetona se realiza por hidrólisis ácida del hidroperóxido de cumeno, con lo que se obtiene fenol como coproducto (Vaquero, 2016). Sin embargo, esta es una reacción que se puede llevar a cabo en un reactor por lotes o semilotes en acero 304, a temperaturas ambiente y sin afectar el material de construcción, con el fin de estudiar una reacción con cinética de pseudoprimer orden que se acerca a la idealidad, usando soluciones diluidas de alcohol diacetona (Russell y Denn, 1976).

Precio de experimentación

Se debe determinar el precio para llevar a cabo cada práctica de laboratorio, pues es un criterio práctico para la selección de reacciones. El precio incluye el costo de las materias primas, por lo que las reacciones escogidas deberán incluir cantidades de reactivos (cuyo precio puede ser considerado en el presupuesto de laboratorios), posibles pérdidas del proceso de experimentación y costos de la disposición de residuos. Adicionalmente, se tiene en cuenta la cantidad de energía necesaria que deba suministrarse o retirarle al reactor, la unidad de adecuación o precalentamiento de materias primas y el intercambiador de calor (que enfría la mezcla de productos y reactivos). Además, se debe sumar el costo por la potencia requerida de las bombas de alimentación. Es preferible reacciones que puedan llevarse a cabo a temperatura ambiente y en modo lotes, ya que el costo de operación en sistemas continuos es mayor que en sistemas que operan de forma discontinua (González, 2000).

Selección

Se escogen aquellas reacciones que, según los criterios expuestos, puedan llevarse a cabo en la planta piloto de reactores. Para el caso del banco de reactores construido en acero inoxidable 304 se aplican las reacciones de saponificación de acetato de etilo, la hidrólisis de anhídrido acético y la descomposición de alcohol diacetona; por otra parte, es necesario verificar las medidas de seguridad, la disposición de residuos de laboratorio y el precio de experimentación.

CONCLUSIONES

El artículo propone ocho criterios para seleccionar reacciones químicas en un banco de reactores de planta piloto, teniendo como referente una unidad construida en acero inoxidable 304. Este estudio concluye que es necesario: a) revisar las tablas de corrosión o resistencia química para conocer el efecto de las sustancias sobre el material de construcción; b) hacer una revisión bibliográfica sobre las fichas de datos de seguridad de los reactivos y productos, con el fin de garantizar la seguridad en el área de experimentación; c) investigar e identificar la naturaleza de los reactivos y de la reacción, con el fin de determinar el método de seguimiento del avance de la reacción; d) conocer la normatividad para la correcta disposición de residuos, y e) investigar la factibilidad académica, industrial e investigativa de la reacción.

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan su gratitud al grupo de investigación en Procesos Separaciones no Convencionales (GPS), por el apoyo a la investigación.

REFERENCIAS

- Acosta, J., y Pérez, R. (2012). *Estudio experimental y simulación de la saponificación de acetato de etilo en tres reactores CSTR en serie* (trabajo de grado). Programa de Ingeniería Química, Facultad de Ciencias e Ingenierías, Universidad de Cartagena, Cartagena, Colombia.
- Alacer Mas. (s. f.). *Tablas de corrosión*. Recuperado de <http://www.alacermas.com/productos.php?categoria=1&subcategoria=152&gama=1&producto=199>

- Anaya, A., y Pedroza, H. (2008). Escalamiento, el arte de la ingeniería química: plantas piloto, el paso entre el huevo y la gallina. *Tecnología, Ciencia, Educación*, 23(1).
- Ardila, E., Tovar, J., y Clavijo, J. (2006-2011). *Química II experimental: guías para las prácticas de laboratorio*. Bogotá D. C.: Fundación Universidad de América,
- Camlab. (s. f.). Introduction to stainless steel. Corrosion Chart. Recuperado de <https://www.camlab.co.uk/originalimages/sitefiles/Stainless%20Steel%20Chemical%20Compatibility.pdf>
- CAP. (s. f.). Efectos de los elementos de aleación. Información del acero. Recuperado de: <http://www.infoacero.cl/acero/efectos.htm>
- Centro Nacional para el Desarrollo del Acero Inoxidable. (s. f.). *Resistencia a la corrosión de los aceros inoxidable*. Recuperado de http://www.iminox.org.mx/downloads/publicaciones/manual_resistencia_a_la_corrosion.pdf
- Construmatica. (s. f.). Propiedades del acero aleado. Recuperado de https://www.construmatica.com/construpedia/Propiedades_del_Acero_Aleado
- Chávez, C. (2014). Acero inoxidable 304 versus 316, ¿cuál es mejor? Armagard. El especialista en armarios para PC lo investiga. Recuperado de <https://www.armagard.es/blog/acero-inoxidable-304-versus-316-cual-es-mejor-armagard-el-especialista-en-armarios-para-pc-lo-investiga/>
- Decreto 4741 de 2005. *Por el cual se reglamenta parcialmente la prevención y manejo de los residuos o desechos peligrosos generados en el marco de la gestión integral*. Diario Oficial 46137, diciembre 30 de 2005.
- González, R. (2000). *Principios de escalado*. Cuba: Universidad de Matanzas.
- Guadalupe, K. (2017). *Diseño de un sistema de gestión de seguridad y salud ocupacional basado en los lineamientos de la norma OHSAS 18001-2007 para la industria farmacéutica laboratorios G. F* (tesis de pregrado). Facultad de ingeniería química, Universidad de Guayaquil, Guayaquil, Ecuador.
- Instituto Nacional de Salud. (2010). *Manual de Gestión Integral de Residuos*. Colombia: Ministerio de Salud y Protección Social. Recuperado de: <https://www.minsalud.gov.co/sites/rid/Lists/BibliotecaDigital/RIDE/IA/INS/manual-gestion-integral-residuos.pdf>
- Kreysa, G., y Schütze, M. (Eds.). (2008). *DECHEMA corrosion handbook. Second, completely revised and extended edition*. Recuperado de <https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpDECHEMA3/dechema-corrosionhandbook/dechema-corrosion-handbook>
- Kumar, A., Kumar, N., Kumar, A., y Das, G. (2014). Corrosion behaviour of stainless steel grade 304 IN-1MHCL. *International Journal of Innovative Research & Development*, 3(5), 340-344
- McGuire, M. (2008). *Stainless Steel for design engineers*. Ohio, EE. UU.: ASM International.
- Sanabria, R. (2017). ¿Qué son los aceros inoxidable de calidad L? Recuperado de <https://www.amas.org/que-son-los-aceros-inoxidables-de-calidad-l/>
- Sykes, P. (1982). *Investigación de mecanismos de reacción en química orgánica*. España: Editorial Reverté.
- Russell, F., Denn, M. (1976). *Introducción al análisis en la ingeniería química*. México: Editorial Limusa.
- Vaquero, F. (2016). *Ingeniería conceptual de una planta de producción de acetona* (tesis de pregrado). Escuela Técnica Superior de Ingeniería, Universidad de Sevilla, Sevilla, España.