

# Reflexiones sobre la necesidad de evaluar la sostenibilidad de un proceso químico industrial

---

**Jorge Eduardo Loayza Pérez**

*Ingeniero químico*

*Miembro del Comité Editorial de la Revista Virtual Pro  
Profesor principal, Facultad de Química e Ingeniería Química*

*Universidad Nacional Mayor de San Marcos*

*Lima, Perú*

*jloayzap@unmsm.edu.pe*

Una de las funciones de los ingenieros de procesos (ingenieros químicos) es el diseño de procesos industriales. Esta actividad es la antesala al diseño de la planta e implica recopilar información sobre el producto deseado —propiedades, características, envasado o transporte—, las materias primas —insumos y fuentes energéticas—, las etapas (tecnologías) para transformar las materias primas e insumos (reactantes) en productos y subproductos, así como los residuos generados en el proceso y qué hacer con ellos. El proceso industrial debe contribuir al desarrollo sostenible, con sus dimensiones económicas, sociales y ambientales. La primera implica no solo un producto de calidad al mínimo costo, sino también que forme parte de un comercio justo que contribuya a la equidad entre los distintos componentes sociales y sin deteriorar el medio ambiente, pensando en las generaciones futuras, no solo las nuestras, sino las de todos.

Los procesos industriales sostenibles (en adelante procesos sostenibles) son aquellos que requiere la industria en el presente siglo en concordancia con la internacionalización de productos y servicios. Tienen distintas características.

En primer lugar, deben ser innovadores, es decir, durante su diseño y el de la planta donde se llevan a cabo es necesario incorporar etapas de eficacia comprobada, aunque es posible también introducir innovaciones al producto.

Por otra parte, tienen que propiciar el uso de recursos renovables o biológicos; si existe esta alternativa, hay que seleccionar este tipo de recursos, los cuales no se extinguirán si se manejan de

manera adecuada. Si se emplean recursos no renovables, esto debe hacerse racionalmente y favoreciendo su reaprovechamiento. Por ejemplo, los minerales de hierro constituyen recursos no renovables con servicios reciclables; así, la chatarra de hierro vuelve a las fundiciones. Asimismo, el siguiente caso contribuye a entender la selección de la materia prima utilizada en el proceso: el alcohol carburante es un compuesto anhidro que se puede obtener por dos vías: sucroquímica —a partir de un recurso renovable como la caña de azúcar— y petroquímica —valiéndose de petróleo, un recurso no renovable—. La opción escogida dependerá tanto de la disponibilidad de la materia prima como de la tecnología existente del proceso.

Un proceso sostenible también debe ser eficiente, lo que implica aprovechar al máximo las materias primas e insumos. Para ello, se puede partir de un análisis desde el punto de la economía atómica calculando un indicador como la economía fraccionaria del átomo (EFA): cuanto más cerca su valor se encuentre a 1, mayor será la cantidad de átomos de los reactantes que formarán parte del producto y, por lo tanto, será menor el número de átomos de los reactantes que formen parte de los subproductos, los residuos o los desechos del proceso. El rendimiento es otro indicador de la marcha adecuada del proceso, cuyo valor deseable debe ser cercano a 1 o 100 %.

Un proceso sostenible debe ser limpio, esto es, generar la menor cantidad de residuos posible. En caso de hacerlo, existen dos alternativas. Por una parte, reaprovechar estos desperdicios mediante reciclaje, recuperación o reuso, convirtiéndose así en subproductos del proceso que tengan alguna salida al mercado tras someterse a un proceso adicional. Por otro lado, disponer de ellos en rellenos de seguridad cuando no tengan las condiciones apropiadas para su explotación.

La seguridad es otra condición de un proceso sostenible y se relaciona con la prevención de accidentes industriales. El proceso a diseñarse y la planta a construirse deben ser seguros, tanto interna —para las instalaciones y quienes trabajan en este— como externamente —para las instalaciones vecinas o las comunidades circundantes—. Por ello, es necesario seleccionar las opciones tanto de materias primas, insumos y energía menos peligrosas como de condiciones de operación más favorables.

Un proceso industrial es un conjunto de etapas, cada una de las cuales se realiza a determinadas condiciones de operación, de tal forma que las materias primas, los insumos y la energía se transforman en productos, subproductos, residuos y desechos. Tales etapas tienen principios similares,

independientemente del proceso que se trate. Son actividades unitarias, siendo posibles transformaciones físicas —operaciones unitarias—, químicas o bioquímicas —procesos unitarios—. Un ejemplo de operación unitaria es la molienda, es decir, la reducción de tamaño de un material mediante cambios físicos. Por su parte, la oxidación de  $\text{SO}_2$  a  $\text{SO}_3$  implica una reacción química y el uso de un catalizador, siendo por tanto un proceso unitario químico. Finalmente, la fermentación es un tipo de proceso unitario biológico.

Es necesario evaluar un proceso sostenible como paradigma deseado. Su sostenibilidad puede estimarse a lo largo de sus diversas etapas y se vale de indicadores. Pero, ¿qué es un indicador? Puede definirse como “un dato o conjunto de datos que ayudan a medir objetivamente la evolución de un proceso o de una actividad” (AENOR, 2003). Así, el uso de indicadores permite la comparación directa de diversos procesos que elaboran un mismo producto:

- A partir de las mismas materias primas e insumos
- A partir de diversas materias primas e insumos
- Utilizando diferentes sistemas reaccionantes
- Generando diferentes subproductos o residuos
- Empleando diversos sistemas de separación, entre otros.

En el caso de procesos industriales, la sostenibilidad no se debe medir con un solo dato, sino con un conjunto de ellos. Es necesario construir un indicador más complejo, un indicador de sostenibilidad ( $IS$ ), que integre otros considerados actualmente: indicadores de eficiencia ( $IEf$ ), de energía ( $IEn$ ), económicos ( $IEc$ ) y ambientales ( $IAm$ ). Se puede representar así:

$$IS = f_1 IEf + f_2 IEn + f_3 IEc + f_4 IAm$$

Donde  $f_1$ ,  $f_2$ ,  $f_3$  y  $f_4$  son ponderaciones cuya suma es igual a 1; las familias de indicadores  $IEf$ ,  $IEn$ ,  $IEc$  e  $IAm$  tienen una ponderación interna. Los evaluadores de la sostenibilidad de un proceso tendrían que construir una relación como la indicada, asignando las ponderaciones respectivas.

La Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (US EPA) encargó a tres de sus investigadores —Raymond L. Smith, Gerardo J. Ruiz-Mercado y Michael A. González— la tarea de diseñar un indicador de sostenibilidad. Ellos lo denominaron GREENSCOPE (*Gauging Reaction*

*Effectiveness for the ENvironmental Sustainability of Chemistries with a Multi-Objective Process Evaluator*) y surgió como resultado de operar con 139 indicadores en cuatro áreas principales: *IEf* (26 indicadores), *IEn* (14 indicadores), *IEc* (33 indicadores) e *IAm* (66 indicadores). Es posible identificar dos estados de referencia para cada uno de los indicadores mencionados: el mejor escenario —valor del indicador 100 % de sostenibilidad o 1— o el peor —valor del indicador 0 % de sostenibilidad o 0—.

Hoy en día, los ingenieros de procesos (ingenieros químicos) tenemos una tarea fundamental: diseñar un proceso que sea sostenible, así como diseñar y operar una planta industrial en la cual este se lleve a cabo. La única forma de confirmar su sostenibilidad es evaluándola mediante indicadores. Es muy común seleccionar aquel proceso cuyo rendimiento sea el mayor. No obstante, tras haber reflexionado sobre el tema llegamos a la conclusión que aquello no basta. Es necesario, por tanto, recopilar la información pertinente para construir una familia de indicadores e integrarlo en un solo indicador de sostenibilidad tal como el GREENSCOPE.

## Referencias

### Sobre estándar para indicadores

Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR) (2003). *Sistemas de gestión de calidad. Guía para la implantación de sistemas de indicadores* (UNE 66175).

### Sobre la metodología usada para la evaluación de sostenibilidad

González, M.A. & Smith R.L. (2003). [A Methodology for the Evaluation of Process Sustainability](#). *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 22(4), 269-276. doi: 10.1002/ep.670220415.

Ruiz-Mercado, G.J., Smith, RL, & González, M.A. (2012). [Sustainability Indicators for Chemical Processes: I. Taxonomy](#). *Industrial & Engineering Chemical Research*, 51(5), 2309-2328. doi: 10.1021/ie102116e.

Ruiz-Mercado, G.J., Smith, RL, & González, M.A. (2012). [Sustainability Indicators for Chemical Processes: II. Data Needs](#). *Industrial & Engineering Chemical Research*, 51(5), 2329-2353. doi: 10.1021/ie200755k.

### **Sobre diversos casos de estudio**

Ruiz-Mercado, G.J., González, M.A., & Smith, R.L. (2013). [Sustainability Indicators for Chemical Processes: III. Biodiesel Case Study](#). *Industrial & Engineering Chemical Research*, 52(20), 6747-6760. doi: 10.1021/ie302804x.

### **Sobre aplicaciones adicionales**

Ruiz-Mercado, G.J., González, M.A., & Smith, R.L. (2014). [Expanding GREENSCOPE beyond the Gate: A Green Chemistry and Life Cycle Perspective](#). *Clean Technologies and Environmental Policy*, 16(4), 703-717. doi: 10.1007/s10098-012-0533-y

Smith, R.L. & Ruiz-Mercado, G.J. (2014). [A Method for Decision Making using Sustainability Metrics](#). *Clean Technologies and Environmental Policy*, 16(4), 749-755. doi: 10.1007/s10098-013-0684-5.