**WP 3 - Integration of production, financial and environmental aspects, risk and uncertainty**

**D3.2 - Informe sobre la incorporación del conocimiento del ciclo de vida al sistema de producción para una mejor sostenibilidad de la cadena de subministro**

Introducción: el análisis de ciclo de vida en los sistemas de producción

La industria se considera comúnmente como una fuente de degradación ambiental y de consumo de recursos; a pesar de ello constituye una parte vital del desarrollo social y de la creación de riqueza. Asimismo, los sistemas industriales causan y determinan flujos de materias y energía a través de la sociedad.

El servicio sostenible se caracteriza como aquél que restringe el consumo de recursos y generación de residuos a un nivel aceptable, considerando las existencias y las velocidades de recuperación de los recursos así como la capacidad de soporte de la Tierra. Asimismo, contribuye de forma positiva a la satisfacción de las necesidades humanas y otorga valor económico a la empresa.

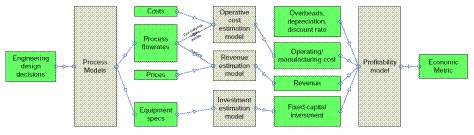
Los aspectos ambientales son generalmente considerados en el diseño de procesos, debido a la presión de las políticas reguladoras y de una tendencia mundial hacia la sostenibilidad en las empresas. Como resultado del aumento de la concienciación ambiental en la industria, se necesitan enfoques más exactos para evaluar la sostenibilidad de los procesos. En este sentido, diversos autores destacan la importancia de tener en cuenta el análisis del ciclo de vida (ACV) de los procesos de producción en la síntesis de procesos, diseño de producto y su integración en el sistema de producción y la cadena de suministro, en general.

Este trabajo evalúa la necesidad de la incorporación del conocimiento del ciclo de vida en el sistema de proceso y propone metodologías para guiar el soporte a la decisión hacia alternativas sostenibles.

Bases para la incorporación del análisis de ciclo de vida en los sistemas de producción

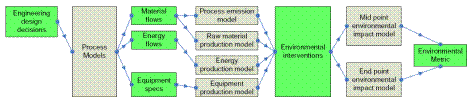
En este estudio, se propone la aplicación sistemática de un procedimiento de uso integrado por cuatro pasos: i) definición de objetivos y ámbito, ii) construcción del modelo y recogida de datos; iii) cálculo de las métricas económicas y medioambientales; y iv) la interpretación de los resultados. En todos los casos, se utilizan modelos matemáticos como herramientas que permiten una representación precisa de la realidad que simulan. Asimismo, se tratan de problemas multiobjetivo, que se resuelven mediante estrategias que permiten restringir la mejor solución de compromiso. Dicho marco se ha aplicado a un amplio abanico de casos industriales, abarcando los diferentes niveles de decisión de los sistemas de producción. Concretamente, se tratan temas de diseño y operación, considerando criterios de sostenibilidad en términos económicos y medioambientales.

Los aspectos económicos han ido de la mano con la ingeniería de procesos desde sus inicios. Múltiples indicadores se han propuesto para comprobar la viabilidad económica de las diferentes opciones de proceso. En general, los indicadores económicos se relacionan con las variables de proceso y los modelos, tal como se muestra en la Figura 4. Sin embargo, ciertos aspectos como los ambientales y sociales, son difíciles de ser traducidos a coste, debido a las complejidades relacionadas con la posibilidad de generar la contabilidad real de los costos internos y externos asociados con la contaminación, minimización de residuos, tratamiento de residuos y la gestión de residuos y sus implicaciones sociales. Por ello, dichas consideraciones merecen una consideración adicional aparte de la meramente económica.



**Figura 4. Relación global entre variables y modelos de proceso para el cálculo de un indicador económico.**

En el caso de los indicadores medioambientales, no hay información fácilmente disponible para su cálculo por el ingeniero de proceso. El cálculo de un indicador del medio ambiente se puede resumir en la Figura 5, que muestra los diferentes modelos para calcular la métrica del medio ambiente.



**Figura 5. Relación global entre variables y modelos de proceso para el cálculo de un indicador medioambiental.**

La mayor parte de metodologías existentes para el cálculo de indicadores ambientales se basan en los conceptos del análisis de ciclo de vida (ACV). Dentro del ACV, se analiza el ciclo de vida de un proceso o producto, teniendo en cuenta el flujo de aguas arriba y aguas abajo del proceso a lo largo del ciclo de vida completo, desde “la cuna hasta la tumba” (cradle-to-grave). El ACV es por lo tanto, un enfoque integral que evita el cambio de las cargas ambientales de una parte a otra de la cadena de suministro proceso.

Precisamente, debido a que el ACV idealmente incluye un enfoque que abarca desde el inicio al final (cradle-to-grave), éste se postula instrumento adecuado para evaluar cuantitativamente las cargas ambientales asociadas al el diseño y operación de una cadena de suministro, y se ha utilizado como herramienta para la evaluación ambiental de los problemas de sistemas de procesos. En general, este tipo de herramientas deben ser útiles en la búsqueda de políticas más efectivas para tratar el cambio climático, y el análisis del comercio internacional debería estar incluido.

Existen una gama de paquetes de software de ACV, como PEMS o SimaPro, e incluyen bases de datos fiables sobre los materiales, energía, transporte y opciones de gestión de residuos. En este trabajo, el Impact2002 + métrica fue adoptada como medida de impacto ambiental global.

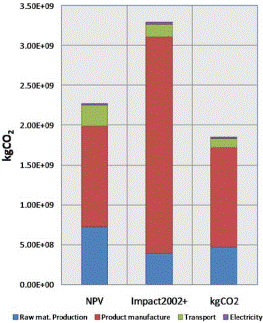
Incorporación del análisis de ciclo de vida en los sistemas de procesos

*Objetivos y alcance*

El trabajo de Lainez et al. (2010) constituye un paso fundamental respecto a los enfoques presentados por otros autores de la literatura, puesto que mejora la planificación y el diseño de las cadenas de suministro bajo consideraciones de impacto económico y ambiental afectando pues a las decisiones tácticas y estratégicas. La cadena de suministro y sus relaciones internas y externas se representan mediante un modelo matemático, que se resuelve con un algoritmo multiobjetivo-MILP. Los resultados permiten llegar a la conclusión que la incorporación de aspectos medioambientales al análisis de la cadena de suministro surgen soluciones de compromiso entre los indicadores ambientales (impactos de daño) y los económicos. Este enfoque reduce el valor de la subjetividad inherente a la asignación de pesos en el cálculo del total de impacto ambiental en la cadena de suministro, también calculado.

La producción de materias primas resultó ser el factor que más contribuye al impacto ambiental global, mientras que el transporte y el consumo de electricidad fueron los menos importantes para el caso de estudio. Esto demuestra que el modelo presentado permite la selección de acciones de mejora y la necesidad de un enfoque con una visibilidad de toda la cadena de suministro. El impacto ambiental depende de manera significativa de las decisiones de compra de materias primas, y dicha dependencia no se puede evaluar sin un enfoque de cadena de suministro, como se ha demostrado. Además, se ha podido determinar utilizando el modelo de optimización que el proceso de producción en el caso de estudio es la actividad que emite la mayor parte del CO2.

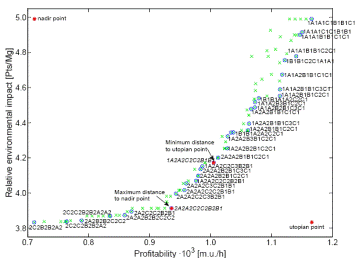
Uno de los principales logros de este trabajo, no es la propuesta y solución de un modelo ambiental complejo, sino la identificación de los peligros potenciales asociados a la implementación de las políticas relacionadas con las emisiones de CO2 en forma aislada con respecto a otros problemas de contaminación asociados. Además, se ha demostrado cómo este tipo de modelos pueden ser utilizados para determinar las políticas de subvenciones a fin de impulsar las decisiones de la industria hacia prácticas más sostenibles medioambientalmente.

****

**Figura 4. Emisiones de CO2 para las configuraciones de máximo VAN, mínimo impacto global y mínimas emisiones de CO2.**

En esta misma línea, el trabajo de Capón-García et al. (2011) introduce una metodología sistemática para ayudar a la planificación y programación de operaciones teniendo en cuenta las consideraciones económicas y ambientales a nivel de planta. Para ello se plantea un modelo matemático, que se resuelve mediante el uso de algoritmos multiobjetivo moMILP / MINLP rigurosos, que permiten la observación de posibles relaciones de compromiso entre los indicadores seleccionados. Concretamente, se obtienen fronteras de Pareto de soluciones que proporcionan al decisor información muy valiosa sobre los programas de producción, y descubre relaciones no evidentes entre las relaciones de secuencia de producción y los objetivos planteados. En este sentido, en función de las funciones objetivo seleccionadas, las soluciones obtenidas pueden ser completamente diferentes, a pesar del hecho de que los objetivos generales económicos o ambientales sean los mismos. El decisor puede llegar a soluciones Pareto completamente diferentes, en términos de número y secuencia de los lotes producidos, así como en el método de cambio de secuencia. Además, en dicho trabajo se aborda la propuesta de métricas de decisión para permitir la elección de una solución única entre todas las de compromiso.

Desde el punto de vista de análisis de ciclo de vida, las relaciones resultantes dan más énfasis al uso racional de los recursos, y por lo tanto tienen que ser considerados. Sin embargo, las mejores métricas a considerar dependen de las circunstancias (por ejemplo, características de la demanda), y ello también condiciona el tipo de problema matemático que se debe resolver. Se ha encontrado que en este caso de estudio de impacto ambiental proviene principalmente de los flujos aguas arriba del proceso, es decir, la producción de las materias primas.

****

**Figura 5. Soluciones para el problema biobjetivo que considera la rentabilidad y el impacto ambiental relativo. Las cruces verdes corresponden a todas las soluciones exploradas; los círculos azules a las soluciones no-dominadas (frontera de Pareto), las estrellas rojas son los punto nadir y utopía, las secuencias en cursiva representan soluciones de compromiso.**

Además, Capón-García et al. (2012) amplía el trabajo anterior en el ámbito de la sostenibilidad de la planificación de la producción, introduciendo metodologías que permiten abordar problemas de tamaño real en la escala industrial mediante el uso de métodos de optimización metaheurísticos.

Perez-Fortes et al. (2010) presentan el análisis de sostenibilidad ambiental y económica en un ciclo combinado de gasificación (IGCC). Dicho sistema de producción de energía combina un sistema de gasificación con ciclo combinado que integra una o varias turbinas de gas y/o una o varias turbinas de vapor, así como un generador de calor de vapor de recuperación del sistema. Este sistema permite la utilización de múltiples combustibles sólidos, si bien generalmente es carbón, para producir electricidad. La biomasa y otros materiales de baja calidad, tales como los residuos sólidos municipales o coque de petróleo, también se pueden utilizar y por lo tanto reducir los costes ambientales de su eliminación. La co-gasificación se puede definir como la gasificación del carbón con otros combustibles, por lo general materiales de desecho y / o la biomasa. En dicho trabajo, se ha propuesto un modelo que ha demostrado ser útil para evaluar las diferentes condiciones de operación IGCC, ya que es capaz de producir resultados precisos para este tipo de centrales eléctricas.

En cuanto a la ACV se encontró que el consumo de materias primas marca el impacto ambiental de la producción de energía en este caso. En este sentido, el coque, que comúnmente se considera un residuo de las refinerías se le ha asignado el 3% de las emisiones asociadas al consumo de petróleo global de crudo de refinería, y por lo tanto sus demandas de energía y exergíason altos. El consumo de carbón se ha demostrado que es más respetuoso del medio ambiente que el consumo de coque. Por otra parte, el carbón es también más eficiente en términos de la cantidad de energía necesaria, teniendo en cuenta que la producción de 1 MJ de energía eléctrica sobre la base de coque requiere 1,85 veces más de energía (en términos CED). Asimismo, el ACV demuestra que la co-gasificación de biomasa reduce el impacto ambiental en general.

Como conclusión de la evaluación realizada y el marco propuesto utilizando el análisis de ciclo de vida, cabe destacar la aparición de importantes soluciones de compromiso en los diferentes niveles de decisión. Asimismo el marco ofrece un enfoque sólido para la trazabilidad y la capacidad de verificación de las diferentes hipótesis de modelado, lo cual refuerza el proceso de toma de decisiones en un entorno de políticas sostenibles.

Referencias

*Presentaciones a congresos y publicaciones*

Capón-García, E.; Bojarski, A.D.; Espuña, A.; Puigjaner, L. “Multiobjective optimisation of multiproduct batch plants scheduling under environmental and economic concerns”  AIChE Journal, 2011, 57 (10), 2766-2782

Capón-García, E.; Bojarski, A.D.; Espuña, A.; Puigjaner, L. “Multiobjective evolutionary optimization of batch process scheduling under environmental and economic concerns”  AIChE Journal, 2012, (enviado)

Laínez, J.M.; Bojarski, A.D.; Puigjaner, L. Chapter Title: "Environmental Considerations into Strategic and Tactical Planning of Supply Chains", in Environmental Planning, Editor: Newton, R.D. Series: Environmental Science, Engineering and Technology (2010). Nova Science Publishers, Hauppauge NY, USA. ISBN: 978-1-61728-654-4

Pérez-Fortes, M.; Bojarski, A.D.; Velo, E.; Puigjaner, L. Chapter Title: "IGCC Power Plants: Conceptual Design And Techno-Economic Optimization" in Clean Energy: Resources, Production and Developments, Editor: Harris, A.D. Series: Energy Science, Engineering and Technology (2010) Nova Science Publishers, Hauppauge NY, USA. ISBN: 978-1-61671-509-2

*Otras publicaciones relacionadas*

Bojarski, A.D.; Laínez, J.M.; Espuña, A.; Puigjaner, L. Incorporating Environmental Impacts and Regulations in a Holistic Supply Chains Modeling: An LCA Approach. Computers & Chemical Engineering, 33 (10): 1747 – 1759 (2009)

Perez-Fortes M.M.; Bojarski, A.D.; Velo, E.; Nougués, J.M.; Puigjaner, L. Conceptual model and evaluation of generated power and emissions in an IGCC plant. Energy, 34, 1721-1732, (2009)