

COPRODUCCIÓN: UNA REVISIÓN DE LA LITERATURA

(Coproductioin: A literature review)

Pilar I. Vidal-Carreras¹

¹ ROGLE. Dpto. de Organización de Empresas. Universidad Politécnica de Valencia. Camino de Vera S/N 46021 Valencia. pivicar@omp.upv.es

Resumen: El objetivo del presente artículo es analizar la literatura existente en el entorno de la coproducción. De acuerdo con Deuermeyer y Pierskalla (1978), es posible afirmar que existe coproducción cuando un proceso productivo da como resultado más de un producto de manera simultánea. La coproducción aparece en ambientes de alta y baja tecnología de producción. La coproducción, suele ocurrir en entornos de producción en los que algunos procesos no se conocen/comprenden perfectamente y/o no están totalmente bajo control (coproducción incontrolada). Sin embargo, tal y como, se ha podido constatar en la realidad industrial, en ocasiones el proceso de coproducción, si se conoce/comprende perfectamente (coproducción controlada). La coproducción puede ser un fenómeno intrínseco al propio proceso productivo (coproducción no deliberada). Aunque en ocasiones puede ser escogida por el gestor del proceso (coproducción deliberada). Así, resulta interesante clasificar la literatura respecto a estas variables, pues hasta la fecha no se había realizado, proporcionando al lector una visión clara de la literatura existente en torno a la coproducción.

Palabras clave: coproducción; revisión de la literatura.

Keywords: coproduction; literature review.

1. Coproducción

El objetivo del presente artículo es analizar la literatura existente en el entorno de la coproducción. De acuerdo Deuermeyer y Pierskalla (1978) es posible afirmar que existe coproducción cuando un proceso productivo da como resultado más de un producto de manera simultánea. La coproducción aparece tanto en ambientes de alta y como de baja tecnología de producción. Aparecen ejemplos en la industria del automóvil (García-Sabater y Vidal-Carreras, 2010; García-Sabater et al., 2005), la industria electrónica (semiconductores, diodos, transistores) (Tomlin y Wang, 2008), la industria petroquímica (Lisbona y Romeo, 2008), la industria del vidrio (Oner y Bilgic, 2008), la industria alimenticia (Bravo et al., 2009) y la industria de la biotecnología (Nielsen et al., 2010).

La coproducción también aparece de algún modo en entornos de problemas de mezcla o ajuste. Por ejemplo, el problema de corte en la industria del vidrio puede verse como un problema de coproducción variable. En Oner y Bilgic (2008) aparece este problema presentando una variabilidad aleatoria en el corte, de acuerdo con las imperfecciones del cristal, que puede dar como resultado uno o varios productos. El problema de corte para la industria de leña de madera joven se considera otro ejemplo de este tipo (Gaudreault et al., 2008).

La coproducción, suele ocurrir en entornos de producción en los que algunos procesos no se conocen/comprenden perfectamente y/o no están totalmente bajo control. Cuando los parámetros no se conocen/comprenden perfectamente hablamos de coproducción incontrolada (Oner y Bilgic, 2008). Sin embargo tal y como se ha podido constatar en la realidad industrial,

en ocasiones el proceso de coproducción si se conoce/comprende perfectamente. En este caso aparece la denominada coproducción controlada (Vidal-Carreras y Garcia-Sabater, 2009).

Otro aspecto a considerar en la coproducción es la deliberación de la misma. En algunas situaciones, no se puede escoger o deliberar la producción, puesto que es algo intrínseco al proceso que siempre ocurre, como por ejemplo la diferenciación de la gasolina de acuerdo con los niveles de octano (Bitran y Dasu, 1992). La coproducción deliberada es aquella en la que la coproducción es decidida por el usuario (Vidal-Carreras y Garcia-Sabater, 2009). Tal y como ocurrió con el control de parámetros de la coproducción, se observa como la mayor parte de la literatura revisada, se centra en considerar una coproducción no deliberada, por tanto el concepto de la deliberación de la coproducción, es un aporte muy interesante a la literatura.

Es interesante distinguir claramente estos casos de coproducción, puesto que la mayor parte de la literatura revisada, se centra en el problema de coproducción incontrolada y no deliberada. En los subapartados siguientes se consideran estos conceptos y las referencias asociadas.

2. Coproducción No controlada y No Deliberada

Se define coproducción incontrolada, como aquel fenómeno de coproducción en el que no se conocen los parámetros asociados al proceso (ratio de producción, tiempos y costes). En la coproducción incontrolada el valor de salida de los parámetros del proceso es aleatorio. Por ejemplo, en la industria de las fibras ópticas, la longitud del segmento es aleatoria, en la industria del acero, el corte de los lingotes tiene un tamaño aleatorio, en la industria del cristal, las imperfección en el cristal son aleatorias (Taskin y Unal, 2009), en la industria electrónica, la frecuencia de los transistores suele ser aleatoria (Bitran y Gilbert, 1994), y en la industria del petróleo los problemas de combinado o mezcla “blending” (Lisbona y Romeo, 2008). Respecto a la consideración de campos aleatorios en la fase lotificación en Yano y Lee (1995) se encuentra una revisión de artículos. La revisión se centra en problemas de una etapa y modelos de un sólo producto (sin coproducción), aunque se destaca que aparecen los “modelos con coproducción” como un apartado de la revisión. Sin embargo, no son excesivas las referencias de artículos incluidas en este apartado (Bitran y Dasu, 1992; Bitran y Gilbert, 1994; Bitran y Leong, 1992).

La coproducción no deliberada es aquella que no se puede evitar, puesto que está embebida dentro del proceso de transformación (Gaudreault et al., 2008). En la mayor parte de la literatura revisada sobre coproducción incontrolada, se presupone que también es no deliberada, aunque esto no esté explícitamente indicado (Oner y Bilgic, 2008). Sin embargo, que sea una coproducción no controlada y no deliberada no implica que no esté planeada y sea deseada (plantas de cogeneración de energía).

En la coproducción incontrolada, el valor de salida de los parámetros del proceso, como la calidad de los productos, pueden ser estocásticos o aleatorios. Como resultado del proceso, aparecen productos con distintas calidades. En este entorno aparece el concepto de subproductos o byproducts. Se considera un subproducto como aquel producto secundario, generalmente útil y comercializable, derivado de un proceso de manufactura que no es el producto primario o el servicio que se produce. En el apartado correspondiente se considera este concepto de subproducto y las referencias asociadas. Se puede definir como producto principal de la coproducción, a aquel que cumple las especificaciones objetivos definidos por el usuario, y subproductos a aquellos productos que no las cumplen completamente. En

ocasiones, el producto secundario es un desecho o *scrap* del proceso, al que se le puede sacar una segunda utilidad. En este sentido, no sería estrictamente un desecho porque no se elimina, y se usa para otro proceso distinto. En el caso de coproducción no controlada de subproductos, se podrían encuadrar los estudios que aparecen en la literatura de procesos productivos que cambian de estar bajo control al estado de fuera de control. En ese momento comienzan a producir productos defectuosos y presentan modelos que estudian la sustitución de la demanda y el proceso de producción imperfecto. Sin embargo, de acuerdo con Oner y Bilgic (2008) en ellos, la coproducción nunca ha sido reconocida.

Es tal la unión en la literatura entre este concepto de subproducto y la coproducción no controlada y no deliberada, que aparecen áreas productivas que intercambian el significado de coproducción y producción de subproductos (Evans, 1969; Ou y Wein, 1995). En estas áreas, la coproducción genera un conjunto determinado de productos que pueden ser clasificados de acuerdo con una jerarquía. La industria electrónica denomina específicamente *binning* al proceso de clasificación de los ítems en distintos grados después de su producción. Los grados pueden definirse de acuerdo al rendimiento de los mismos en ciertas especificaciones o de acuerdo con su uso final. De la primera circunstancia se puede citar el ejemplo de los semiconductores, que se clasifican de acuerdo con su velocidad. De la segunda circunstancia, se cita la distinta exigencia en fiabilidad de un transductor empleado para aplicaciones domésticas, frente a uno empleado como aparato para mantener la vida de una persona, como puede ser una máquina de circulación extracorpórea.

Directamente relacionado con el concepto de subproducto, aparece el concepto de la sustituibilidad de la demanda (Mcgillivray y Silver, 1978). Se entiende como demanda sustituible aquella que puede ser satisfecha por otra. En McGillivray y Silver (1978) aparecen ejemplos prácticos de ítems que tiene parte de la demanda sustituibles como: (i) los consumidores determinados productos tales como diferentes marcas de cereales (ii) los productos de ferretería específicos al por menor, como las diferentes marcas de pintura o diferentes tamaños de envases de la misma marca, (iii) cierto tipo de bienes, por ejemplo, dos vestidos del mismo estilo y tamaño, pero de diferentes colores. Cuando la demanda es no sustituible, significa que cada producto dispone de su propio mercado, de modo que el cliente que ha pedido un tipo de producto no está satisfecho si se le entrega otro, aunque sea de un nivel superior. Esto puede ser debido a que la jerarquía que aparece en los productos, no está basada sólo en la calidad. Además este demanda sustuible puede ser transitiva o no transitiva. Se considera transitiva la sustitución de la demanda, si las demandas de los productos pedidos pueden ser satisfechas con los inventarios de otros siempre que estos sean de un pedido superior. La sustitución de la demanda puede ser considerada en sólo sentido (Bitran y Dasu, 1992c; Bitran y Gilbert, 1994; Bitran y Leong, 1992; Nahmias y Moinzadeh, 1997). Esta transitividad de la sustitución de la demanda requiere especificaciones de los productos anidadas. Es decir, que las especificaciones de productos de pedidos inferiores, estén incluidas en las especificaciones de los productos de pedidos superiores. En el caso de las especificaciones de los productos se encuentren solapadas de forma parcial, se considera una sustitución de la demanda no transitiva (Bitran y Leong, 1995). En Bitran y Leong (1995) se trata el mismo problema planteado en (Bitran y Leong, 1992; Bitran y Yanasse, 1984) sólo que en este trabajo, se considera una demanda no transitiva. En este caso, es difícil distinguir el producto principal de los subproductos, debido a que ambos son igual de importantes (Bitran y Leong, 1995). Los autores proponen un sencillo método que pretende transformar los problemas no transitivos en transitivos, para poder aplicar entonces métodos propios de problemas transitivos, a los problemas no transitivos iniciales. Cuando existe transitividad en la sustitución de la demanda, es necesario establecer en cada uno de los periodos productivos

como almacenar y asignar el inventario disponible, para satisfacer la demanda de los productos.

Son muchos los artículos que consideran la demanda sustituible con coproducción no deliberada e incontrolada (Bitran y Dasu, 1992b; Bitran y Gilbert, 1994; Bitran y Leong, 1992; Bitran y Yanasse, 1984; Duenyas y Tsai, 2000; Gerchak et al., 1996; Nahmias y Moinzadeh, 1997; Ou y Wein, 1995). Sin embargo, en el trabajo de Oner y Bilgic (2008) se estudian los efectos de la coproducción no controlada de varios productos, cuya demanda no es sustituible. Se asume que la producción no se puede controlar por motivos técnicos y/o económicos. En este trabajo, se introducen dos modelos que modifican el enfoque del ciclo común en el *ELSP* con o sin pedidos pendientes. Los resultados muestran que el tiempo de ciclo aumenta con el ratio de coproducción y la utilización del sistema. No parece que existan efectos visibles en los costes a largo plazo. Un ejemplo de esta casuística aparece en la industria del cristal, para ver más detalles consultar el artículo completo. La jerarquía que aparece en los productos, no está basada sólo en la calidad, lo que influye directamente en la no sustituibilidad de los productos.

En Bitran y Dasu (1992) se presenta un ejemplo de una jerarquía de este calidad, para una empresa que fabrica diodos. En este artículo, los parámetros asociados al proceso son estocásticos. Es interesante destacar el concepto de familias de productos que aparece. Estas familias incluyen productos que a la vez son subproductos unos de otros. En la práctica, los responsables de la producción tienen clara la definición de familia. Para estos, una familia de productos suele incluir a un conjunto mínimo de productos que se almacenan de manera conjunta o cuyos inventarios son compartidos. Dentro de las familias de productos existen autores que añaden tan solo un proceso junto con su producto y subproductos, mientras que otros consideran que en una familia existe más de un proceso (Bitran y Leong, 1995). Los procesos de la familia de productos pueden estar definidos previamente y ser limitados o por el contrario tratarse de un conjunto muy elevado, puesto que se obtienen a partir de pequeños ajustes en los procesos iniciales. La existencia de más de un proceso en una familia de productos, exige la complicación adicional de la elección del proceso más óptimo, para cada uno de los periodos productivos.

En Bitran y Gilbert (1994) se considera el mismo problema que en Bitran y Dasu (1992) y se añade a la coproducción la complejidad de campos aleatorios. En el entorno de los semiconductores, se plantea el caso de la fabricación de diodos, que está fuertemente afectada por condiciones externas como pueden ser la temperatura, vibraciones o la presencia de polvo en el proceso que afectan a la calidad de la salida de productos. De este modo, en un mismo proceso, salen distintos diodos con variaciones en las especificaciones. Estas características internas son incontrolables para los productores y se encuentran anidadas, de modo que su demanda es sustituible. Se describe un método que permite obtener una cota mínima y varias heurísticas para resolver el problema en la práctica. Para evaluar los métodos planteados se emplea la simulación Monte Carlo.

En Gerchak et al (1996) se trabaja en el contexto de un solo periodo y modelos tipo *EOQ*. Ellos asumen que sólo hay dos tipos del producto, y el producto de grado superior, puede ser sustituido por el producto de menor calidad. Para el caso de un solo periodo, se consideran dos escenarios: un proceso que produce dos grados al azar con los rendimientos, y dos procesos diferentes. En uno de estos procesos se producen todos los grados de calidad y en el otro proceso sólo se puede producir el grado más bajo (con un rendimiento aleatorio). Se muestra que las funciones que competen el beneficio esperado son cóncavas. Para los

modelos *EOQ*, se asume que una orden es servida sólo cuando ambas calidades del producto se han agotado. La cantidad óptima de pedido se obtiene en forma cerrada. El coste de la sustitución del producto de menor calidad también es considerado. En Gerchak y Grosfeld-Nir (1999) se generaliza el modelo incluyendo múltiples grados en la sustitución de productos en el entorno MLPO (*Multiple Lotsizing In Production To Order*). En Grosfeld-Nir y Gerchak (2004) se revisa los recientes avances sobre campos aleatorios en el entorno *MLPO*.

En Nahmias y Moinzadeh (1997) se considera un entorno de industria electrónica en el que se limita que la calidad de la salida se ajusta a dos niveles diferentes. La distribución de estos niveles de calidad, es una variable aleatoria, que se asume que sigue una distribución log normal. La demanda es sustituible en un solo sentido hacia abajo. Se asume que las demandas de los productos son conocidas y constantes. Los autores revisan la clásica fórmula del *EOQ* para encontrar los puntos de reorden óptimos, considerando que los datos de salida de los productos son estocásticos,

En Taskin y Unal (2009), se investiga el problema en el nivel de programación táctica, para la fabricación de vidrio flotado con lotes de coproducción controlada parcialmente, rendimientos aleatorios, producción no-interrumpible, relación compleja entre productos y demanda sustituible. En este trabajo, se habla de coproducción controlada puesto que se afirma que en la industria fabricación de vidrio flotado, se permite controlar el tipo y la proporción de productos producidos al mismo tiempo, dentro de ciertos límites. Sin embargo tal y como se afirma en las hipótesis del problema, la coproducción es no deliberada puesto que “varios productos se producen al mismo tiempo por la naturaleza de la proceso”.

3. Coproducción Controlada y Deliberada

Se define coproducción controlada (Vidal-Carreras y Garcia-Sabater, 2009) como aquel fenómeno de coproducción en el que se conocen los parámetros asociados al proceso (ratio de producción, tiempos y costes). Se dice que es deliberada cuando se puede decidir fabricar con coproducción o independientemente cada producto.

El trabajo de Deuermeyer y Pierskalla (1978) es el primero conocido que considera coproducción con un rendimiento fijo, por lo que podemos afirmar que esta coproducción está controlada y deliberada. En el artículo, se propone un modelo de control óptimo, para reducir al mínimo los costos de producción, inventarios y pedidos pendientes en un sistema de dos productos. Los procesos de producción son conocidos y la capacidad es infinita. La demanda de los productos es aleatoria, pero no sustituible. El proceso A produce dos productos 1 y 2, mientras que el proceso B sólo es capaz de producir el producto 2. Estos autores, muestran cómo puede ser óptimo producir artículos en forma conjunta o por separado, dependiendo de las existencias actuales, que se muestran como funciones monótonas. En Deuermeyer (1979) se considera el mismo problema con productos perecederos: en la industria láctea con diversos derivados de la leche, en la industria fotográfica con diferentes tipos o tamaños de film fotográfico y en la industria médica con distintos exámenes a partir de un mismo banco de sangre.

En Vidal-Carreras et al (2008) se plantea el problema de la coproducción deliberada y se realiza un estudio sobre la complejidad de la solución, planteando mecanismos alternativos de resolución. Vidal-Carreras y Garcia-Sabater (2009) considera una variación de *ELSP* con coproducción con diferentes políticas de secuenciación que son simuladas con distintos productos cuyas demandas son no sustituibles.

4. Conclusiones

El presente trabajo pretende proporcionar una visión completa del estado del problema de coproducción en la literatura. De este modo proporciona un punto de partida para el autor siendo posible identificar posibles líneas de investigación en el entorno de la coproducción. Como ejemplo podríamos señalar la coproducción deliberada y controlada, las familias de productos resultantes del proceso que no siguen una jerarquía de acuerdo a su calidad, o la posibilidad de una coproducción en paralelo.

5. Agradecimientos

Este trabajo ha sido realizado gracias a la financiación del Ministerio de Ciencia e Innovación a través del proyecto CORSARI MAGIC: Coordinación de operaciones en redes de suministro/demanda ajustadas, resilientes a la incertidumbre: modelos y algoritmos para la gestión de la incertidumbre y la complejidad, DPI: 2010-18243.

6. Referencias

- Bitran, G. B.; Leong, T. Y. (1995). Coproduction of Substitutable Products. *Production Planning & Control*, Vol. 6, nº 1, pp. 13-25.
- Bitran, G. R.; Dasu, S. (1992). Ordering Policies in An Environment of Stochastic Yields and Substitutable Demands. *Operations Research*, Vol. 40, nº 5, pp. 999-1017.
- Bitran, G. R.; Gilbert, S. M. (1994). Coproduction Processes with Random Yields in the Semiconductor Industry. *Operations Research*, Vol. 42, nº 3, pp. 476-491.
- Bitran, G. R.; Leong, T. Y. (1992). Deterministic Approximations to Coproduction Problems with Service Constraints and Random Yields. *Management Science*, Vol. 38, nº 5, pp. 724-742.
- Bitran, G. R.; Yanasse, H. H. (1984). Deterministic Approximations to Stochastic Production Problems. *Operations Research*, Vol. 32, nº 5, pp. 999-1018.
- Bravo, D.; Rodriguez, E.; Medina, M. (2009). Nisin and lacticin 481 coproduction by *Lactococcus lactis* strains isolated from raw ewes' milk. *Journal of Dairy Science*, Vol. 92, nº 10, pp. 4805-4811.
- Deurmeyer, B. L. (1979). Multi-Type Production System for Perishable Inventories. *Operations Research*, Vol. 27, nº 5, pp. 935-943.
- Deurmeyer, B. L.; Pierskalla, W. P. (1978). By-Product Production System with An Alternative. *Management Science*, Vol. 24, nº 13, pp. 1373-1383.
- Duenyas, I.; Tsai, C. Y. (2000). Control of a manufacturing system with random product yield and downward substitutability. *IIE Transactions*, Vol. 32, nº 9, pp. 785-795.
- Evans, R. V. (1969). Inventory Control of By-Products. *Naval Research Logistics Quarterly*, Vol. 16, nº 1, p. 85-&.
- García-Sabater, J. P.; Vidal-Carreras, P. I. (2010). Programación de producción en los proveedores del automóvil. *Revista Virtual Pro*, Vol. 104, p. 23.
- García-Sabater, J. P., Vidal-Carreras, P.I., & García-Sabater, J. J. (2005). Estudio de la Problemática de Programación de la Producción en el sector del Automóvil. Aplicación a una red de fabricación, in VIII Congreso de Ingeniería de Organización.
- Gaudreault, J.; Frayret, J. M.; Rousseau, A.; D'Amours, S. (2008a). Combined planning and scheduling in a divergent production system with a co-production. Working Paper, Vol. DT-2006-JMF-1.
- Gaudreault, J.; Frayret, J. M.; Rousseau, A.; D'Amours, S. (2008b). Combined planning and scheduling in a divergent production system with a co-production. Working Paper, Vol. DT-2006-JMF-1.

- Gerchak, Y.; Grosfeld-Nir, A. (1999). Lot-sizing for substitutable, production-to-order parts with random functionality yields. *International Journal of Flexible Manufacturing Systems*, Vol. 11, n° 4, pp. 371-377.
- Gerchak, Y.; Tripathy, A.; Wang, K. (1996). Co-production models with random functionality yields. *IIE Transactions*, Vol. 28, n° 5, pp. 391-403.
- Grosfeld-Nir, A.; Gerchak, Y. (2004). Multiple lotsizing in production to order with random yields: Review of recent advances. *Annals of Operations Research*, Vol. 126, n° 1-4, pp. 43-69.
- Lisbona, P.; Romeo, L. M. (2008). Enhanced coal gasification heated by unmixed combustion integrated with an hybrid system of SOFC/GT. *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 33, n° 20, pp. 5755-5764.
- Mcgillivray, A. R.; Silver, E. A. (1978). Some Concepts for Inventory Control Under Substitutable Demand. *Infor*, Vol. 16, n° 1, pp. 47-63.
- Nahmias, S.; Moinzadeh, K. (1997). Lot sizing with randomly graded yields. *Operations Research*, Vol. 45, n° 6, pp. 974-986.
- Nielsen, D. R.; Yoon, S. H.; Yuan, C. J.; Prather, K. L. J. (2010). Metabolic engineering of acetoin and meso-2,3-butanediol biosynthesis in *E. coli*. *Biotechnology Journal*, Vol. 5, n° 3, pp. 274-284.
- Oner, S.; Bilgic, T. (2008). Economic lot scheduling with uncontrolled co-production. *European Journal of Operational Research*, Vol. 188, n° 3, pp. 793-810.
- Ou, J. H.; Wein, L. M. (1995). Dynamic Scheduling of a production inventory system with by-products and random yield. *Management Science*, Vol. 41, n° 6, pp. 1000-1017.
- Taskin, Z. C.; Unal, A. T. (2009). Tactical level planning in float glass manufacturing with co-production, random yields and substitutable products. *European Journal of Operational Research*, Vol. 199, n° 1, pp. 252-261.
- Tomlin, B.; Wang, Y. (2008). Pricing and operational recourse in coproduction systems. *Management Science*, Vol. 54, n° 3, pp. 522-537.
- Vidal-Carreras, P. I.; Garcia-Sabater, J. P. (2009). Comparison of heuristics for an economic lot scheduling problem with deliberated coproduction. *Journal of Industrial Engineering and Management*, Vol. 2, n° 3, pp. 437-463.
- Vidal-Carreras, P. I., Garcia-Sabater, J. P., Marín-Garcia, J. A., & Garcia-Sabater, J. J. (2008). Parts Grouping in ELSP, in 2nd International Conference on Industrial Engineering and Industrial Management, Universidad de Burgos, ed., p. 291.
- Yano, C. A.; Lee, H. L. (1995). Lot-Sizing with Random Yields - A Review. *Operations Research*, Vol. 43, n° 2, pp. 311-334.