



# FORMULACIÓN MIXTA ENTERA LINEAL APLICADA AL DISEÑO DE PRODUCTOS PARA MAXIMIZAR EL BENEFICIO ECONÓMICO

Bonino, Sergio<sup>1</sup>

<sup>1</sup>INTEC - Facultad de Ingeniería Química -UNL  
Director: Zeballos, Luis J.

Área: Ingeniería

Palabras claves: Re-manufactura, modelado matemático, ciclo de vida.

## INTRODUCCIÓN

En los últimos tiempos, ha ido creciendo la necesidad de que las compañías manufacturen productos amigables con el medio ambiente para contribuir con la protección del mismo. La re-manufactura de productos usados es una posibilidad excelente para las organizaciones que buscan proteger el medio ambiente, dado que dicha actividad en muchos casos permite disminuir el impacto ambiental de los productos y, al mismo tiempo, incrementar el beneficio económico.

En este contexto, la etapa de diseño de los productos ha sido señalada por muchos autores (Handfield y colab., 2001; Fiksel, 1996; Bras, 1997; Ashley, 1993) como una de las instancias más relevantes del ciclo de vida de los productos dado el impacto que las decisiones allí adoptadas tienen sobre las actividades económicas, sociales y ambientales de las empresas. Además, varios de los autores mencionados han señalado a la etapa de diseño como aquella que brinda las oportunidades más significativas para reducir el impacto ambiental de las actividades de manufactura de productos. En esta instancia se pueden realizar acciones tendientes a aprovechar condiciones económicas y ambientales relacionadas con los productos retornados por los clientes.

En la etapa de diseño previamente mencionada, se deben tomar decisiones tendientes a determinar especificaciones, precios de venta y estrategias de producción (cantidades a producir, tasa de recupero) tanto de productos nuevos como re-manufacturados.

Una de las maneras de abordar la problemática de la toma de decisiones mencionada es mediante la técnica de modelado matemático. Dicha técnica permite describir las relaciones que existen entre las variables, los parámetros y las restricciones del problema. La representación del problema abordado utilizando formulación matemática conduce naturalmente a una estructura de modelo de tipo mixta entera no lineal (MINLP). Es importante mencionar que la resolución del problema considerando su estructura no lineal no es trivial. En muchos casos, los algoritmos de resolución disponibles para resolver el modelo MINLP no han podido alcanzar las soluciones óptimas globales a distintas instancias prácticas del problema en tiempos de cómputos adecuados. Esto da sustento a la búsqueda de una nueva formulación de tipo mixta

Título del proyecto: Modelos y estrategias innovadoras para la producción y distribución sustentable en procesos industriales complejos

Instrumento: CAI+D

Año convocatoria: 2016

Organismo financiador: UNL

Director: Méndez, Carlos

entera lineal (MILP) capaz de obtener soluciones de mejor calidad (soluciones óptimas globales o soluciones cercanas a las óptimas globales) en tiempos de CPU aceptables para el problema de diseño.

## OBJETIVOS

- Desarrollar una formulación matemática mixta entera lineal para maximizar el beneficio económico total del ciclo de vida de los productos mediante la consideración explícita de las especificaciones de diseño y precio de venta de los productos nuevos y re-manufacturados.
- Extender la formulación matemática antes desarrollada para maximizar el beneficio económico total del ciclo de vida de los productos mientras se minimiza el impacto ambiental de las actividades desarrolladas.

## METODOLOGÍA

Se estudió el problema de diseño de productos y las alternativas existentes para representar matemáticamente el mismo. Para ello se leyeron y analizaron los trabajos de investigación más relevantes disponibles en la bibliografía. Para el desarrollo de la formulación MILP, se tomó como base el trabajo presentado por los autores Kwak y Kim (2015), en el cual se introduce una formulación MINLP.

La formulación lineal desarrollada se obtuvo mediante el uso de técnicas tales como: la linealización por tramos, big Ms y aproximación por planos de McCormick. La linealización por tramos fue aplicada a las funciones de demanda de productos nuevos y re-manufacturados que naturalmente son funciones de carácter no lineal. Con el objeto de obtener una linealización por tramos con un buen ajuste a la curva real, la longitud de cada tramo se determinó en base a un error absoluto máximo. Por otro lado, las técnicas de big M y de aproximación por planos de McCormick fueron aplicadas para linealizar las diversas expresiones no lineales encontradas en la formulación MINLP original. La aproximación por planos de McCormick permitió modelar el comportamiento de la multiplicación de dos variables. La aplicación de esta metodología llevó a considerar, en cada término donde dos variables aparecen multiplicadas entre sí, a una de las variables como continua y a la otra como discreta. En el problema abordado se discretizaron las variables que indican la cantidad a producir de productos nuevos y re-manufacturados.

Posteriormente, la formulación MILP fue ampliada con el objeto de cuantificar el impacto ambiental de las decisiones de diseño para luego considerar la minimización del mismo. En este caso, se usó el concepto de “ahorro del impacto ambiental” introducido por Kwak y Kim (2015).

La formulación MILP resultante fue implementada en un software de modelado algebraico denominado GAMS.

## RESULTADOS

Se obtuvo un modelo MILP, el cual se aplicó a un problema de diseño de computadoras de escritorio (Kwak y Kim 2015) con el objeto de medir su desempeño. El problema fue resuelto utilizando el “solver” CPLEX. Los resultados obtenidos fueron comparados con las soluciones reportadas por Kwak y Kim (2015). La comparación se llevó a cabo en términos de valores de las funciones objetivo y de los tiempos de CPU requeridos para obtener las soluciones. Además, la formulación MINLP propuesta por Kwak y Kim (2015) fue implementada en GAMS y resuelta utilizando el “solver” BARON con el objeto de comparar adecuadamente los resultados obtenidos por el modelo MILP desarrollado y la formulación no lineal propuesta por los autores.

En la Tabla 1 y 2, se muestran los resultados obtenidos para dos instancias de problemas diferentes, donde a cada instancia se le aplican cuatro alternativas de resolución diferentes.

El escenario 1 fue resuelto considerando como función objetivo el beneficio económico total del ciclo de vida de los productos (BCV). El escenario 2 fue resuelto considerando una función bi-objetivo donde se maximiza el beneficio total del ciclo de vida de los productos cuando se considera un límite mínimo del 40% para el ahorro del impacto ambiental (AIA).

Las cuatro alternativas de resolución hacen referencia a: 1) la metodología usada por Kwak y Kim (2015) (MINLP-GRG); 2) la resolución del modelo MINLP utilizando el “solver” BARON (MINLP-BARON) considerando un tiempo máximo de procesamiento de 7000 segundos; 3) al abordaje del problema mediante la formulación MILP propuesta, utilizando el “solver” CPLEX (MILP-CPLEX); 4) la resolución del modelo MINLP con información proveniente de la formulación MILP, utilizando el “solver” BARON (MINLP-BARON-UNUR). La alternativa número cuatro surge debido a que el modelo MILP es una aproximación y las soluciones allí obtenidas pueden ser infactibles o subóptimas en el modelado MINLP.

Los valores presentados en la Tabla 1 representan: el beneficio económico obtenido (BCV), los niveles de ahorro del impacto ambiental alcanzados (AIA), los tiempos de resolución, los precios de venta y las cantidades producidas para los productos nuevos y re-manufacturados, como así también la tasa de recupero ( $\alpha$ ). En la Tabla 2, se encuentran las especificaciones de diseño obtenidas para los distintos componentes, indicando la diferencia generacional de cada parte instalada. Además, en la Tabla 2 se indica si las partes originales recuperadas de los productos re-manufacturados se actualizaron (ug).

Se observará que en ambas tablas aparecen celdas que incluyen dos números separados por una barra. Mientras el primer número representa el valor obtenido en ese campo para los productos nuevos, el segundo indica el valor adoptado para los productos re-manufacturados.

**Tabla 1.** Soluciones obtenidas para los casos analizados

Caso	Modelo	Tiempo de CPU [s]	BCV [\$]	AIA [kg CO2e]	Precios [\$]	Cantidad producida [ud]	$\alpha$
1	MINLP-GRG	NR	3250921,00	134196,00	999,99/346,24	10020 / 692	0,1486
	MINLP-BARON	7000,01	3153273,71	167372,46	987,65/340,16	9632 / 829	0,1853
	MILP - CPLEX	4797,171	3324834,35	193460,84	999,99/310,46	10171 / 935	0,1982
	MINLP-BARON-UNUR	20,2	3295278,60	177248,12	1000/320,51	10169 / 850	0,1799
2	MINLP-GRG	NR	2774972,00	754582,00	999,99/112,24	10020/3891	NR
	MINLP-BARON	4962,42	2947685,49	765932,84	1000/141,48	11068/3246	0,6312
	MILP - CPLEX	2767,66	3003208,55	765713,80	999,99/142,09	11074/3245	0,6379
	MINLP-BARON-UNUR	5,27	2947843,08	765713,80	1000/141,53	11068/3245	0,6315

NR: No Reportado

Las soluciones encontradas por la formulación MILP propuesta son mejores que las soluciones reportados por Kwak y Kim (2015). Las mejoras se reflejan en el incremento del beneficio económico de la empresa. Además, es importante destacar que los tiempos de CPU requeridos por el modelo MILP (MILP - CPLEX) para obtener las mejores soluciones son inferiores a los tiempos de procesamiento del modelo MINLP resuelto usando el “solver” BARON (MINLP – BARON).

**Tabla 2.** Especificaciones de diseño para los casos analizados

Caso	Modelo	Especificaciones de las partes						
		CPU	RAM	MB	HD	GC	OD	Ch
1	MINLP-GRG	0 / 2	0 / 0(ug)	0 / 2	0 / 4	3 / 5(ug)	1 / 2	0 / 0
	MINLP-BARON	0 / 1(ug)	0 / 1(ug)	0 / 2	0 / 4	3 / 5(ug)	2 / 1(ug)	0 / 0
	MILP - CPLEX	0 / 2	0 / 0(ug)	0 / 2	0 / 4	3 / 5(ug)	1 / 2	0 / 0
	MINLP-BARON- UNUR	0 / 2	0 / 0(ug)	0 / 2	0 / 4	3 / 5(ug)	1 / 2	0 / 0
2	MINLP-GRG	0 / 2	0 / 0(ug)	0 / 2	0 / 4	3 / 5(ug)	1 / 2	0 / 0
	MINLP-BARON	0 / 2	0 / 0(ug)	0 / 2	0 / 4	1 / 5	1 / 2	0 / 0
	MILP - CPLEX	0 / 2	0 / 0(ug)	0 / 2	0 / 4	1 / 5	1 / 2	0 / 0
	MINLP-BARON- UNUR	0 / 2	0 / 0(ug)	0 / 2	0 / 4	1 / 5	1 / 2	0 / 0

CPU: Central processing unit; RAM: Memory; MB: Motherboard; HD: Hard drive; GC: Graphic card; OD: Optical drive; Ch: Chassis

Considerando las soluciones obtenidas en el escenario 2 para las alternativas MINLP-BARON-UNUR y MINLP-GRG, se puede observar que la solución encontrada por el modelo MINLP-BARON-UNUR incrementa el BCV en \$172.871,08 y el AIA en 11.131,8 kgCO<sub>2</sub>e. Las cantidades a producir de productos nuevos aumentan en 1.048 unidades mientras que las cantidades de productos re-manufacturados se reducen en 646 unidades cuando se comparan los valores obtenidos mediante MINLP-BARON-UNUR con los presentados en MINLP-GRG. Al comparar los precios de venta, los mismos son similares cuando se trata de los productos nuevos pero la solución dada por el modelo MINLP-BARON-UNUR considera un precio mayor para el caso de productos re-manufacturados (incremento de \$29,29). Al analizar las especificaciones de las partes se puede observar que las mismas son muy similares en ambas soluciones, la única diferencia se presenta en las especificaciones de la placa gráfica (GC) seleccionada.

## CONCLUSIÓN

El modelo MILP desarrollado en este trabajo ha demostrado ser una herramienta robusta, rápida y eficiente para encontrar soluciones factibles cuando se lo aplica a la problemática de diseño de productos.

## REFERENCIAS

- Ashley, S.**, (1993). *Designing for the Environment*. Mechanical Engineering, 115(3), 53–55.
- Bras, B.**, (1997). *Incorporating Environmental Issues in Product Design and Realization*. UNEP Industry and Environment, 20(1–2), 5–13.
- Fiksel, J.**, (1996). *Design for Environment: Creating Eco-efficient Products and Processes*, McGraw-Hill, NY.
- Handfield, R.B., y colab.**, (2001). *Integrating Environmental Concerns into the Design Process: The Gap between Theory and Practice*. IEEE Transactions on Engineering Management, 48(2), 189–208.
- Kwak, M., y Kim, H.**, (2015). *Design for Life-Cycle Profit with Simultaneous Consideration of Initial Manufacturing and End-of-Life Remanufacturing*. Engineering Optimization, 47 (1): 18–35.