

## Diseño modular de máquinas: caso de estudio de las cosechadoras de caña de azúcar de fabricación cubana

### Modular design of machines: study case of Cuban sugar cane harvesters

Fernando Expósito-Gallardo<sup>1</sup>, Guillermo Reyes-Pozo<sup>2</sup>, Roberto Pérez-Rodríguez<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Centro de Desarrollo de la Maquinaria Agrícola, Holguín, Cuba, [fexposito@cedema.co.cu](mailto:fexposito@cedema.co.cu)

<sup>2</sup> Instituto Químico de Sarriá, Barcelona, España, [guillermo.reyes@iqs.url.edu](mailto:guillermo.reyes@iqs.url.edu)

<sup>3</sup> Centro de Estudios CAD/CAM, Universidad de Holguín, Holguín, Cuba, e-mail: [roberto.perez@uho.edu.cu](mailto:roberto.perez@uho.edu.cu)

#### RESUMEN

La arquitectura de un producto tiene un efecto significativo en el proceso de desarrollo de un producto y en todo su ciclo de vida. La eficiencia de la arquitectura de un producto puede variar dependiendo del objetivo de la modularización del producto. Este artículo utiliza la técnica de *clustering* DSM para identificar los candidatos modulares en una representación modular de productos mecánicos. El enfoque propuesto se prueba en el diseño de las cosechadoras de caña de producción nacional.

Palabras claves: Diseño modular; cosechadoras; caña de azúcar; DSM.

#### ABSTRACT

The product architecture has a significant effect on the product development process and on the whole product lifecycle. The efficiency of product architecture may also vary depending on the aim of the product modularization. This paper uses a DSM clustering technique to identify module candidates in matrix representations of mechanical product. The proposed approach is tested on the cab of a Cuban sugar cane harvester.

Keywords: Modular design; harvester; sugar cane; DSM.

#### 1. INTRODUCCIÓN

Hoy en día crece la tendencia de concebir y diseñar los productos, según los principios de la modularidad. Los productos a lo largo del tiempo han sufrido cambios de filosofía como consecuencia a la toma de consideración del ciclo de vida y de la necesidad de las empresas de establecer una gama coherente y racional de los mismos.

Erixon identificó 12 aspectos para la modularización y los clasificó en seis grupos: diseño y desarrollo, varianza, manufactura, calidad, compra y post-compra (Erixon, 1996). Por su parte, Stake reprocesó esta clasificación para arribar a dos cuestiones fundamentales de la modularización: la planificación de la gestión del producto y la estructuración funcional (Bonvoisin, Halstenberg, Buchert, & Stark, 2016).

Varios criterios, así como métodos paso a paso para el diseño modular de productos han sido desarrollados y publicados, que permite apoyar el proceso de agrupar elementos en módulos y de definición de interfaces. Sin embargo, los métodos y criterios han sido generalmente definidos conjuntamente y, por lo tanto, no es directamente posible utilizar un método con un criterio para el cual no se haya desarrollado. Esto constituye una limitación en el soporte que estos. Los métodos pueden ofrecer el uso de la modularización de productos en el desarrollo de productos sostenibles (Gershenson, Prasad, & Zhang, 2003).

En la teoría de las arquitecturas modulares de productos, los módulos se definen usualmente maximizando la independencia de los módulos. Gershenson (Gershenson et al., 2003), plantearon que 'Los sistemas modulares están compuestos de elementos o módulos que

independientemente desempeñan funciones distintivas'. Hölttä-Otto et al. también definió a los módulos como 'Un módulo es una parte relativamente independiente de un Sistema y está ligeramente acoplado al resto del sistema' (Hölttä-Otto, Chiriac, Lysy, & Suh, 2012).

En la revisión de métodos para el diseño modular de productos, se evidencia que no existe una medida ampliamente adoptada de la modularidad de un producto, ni una metodología sistemática que ayude a los diseñadores a aumentar la modularidad de un producto. Según los autores, existe una desafortunada ambigüedad en el uso de los términos "módulo", "modularidad" y "modularización". Por tanto, se debe explicar primero este campo y proporcionar definiciones apropiadas para una comprensión general (Gershenson et al., 2003).

El mayor denominador común de las definiciones disponibles del concepto de un módulo es que son un grupo de portadores funcionales (como componentes o partes, o elementos físicos en un producto que contribuyen a una función determinada o un conjunto de funciones). Considerando la hipótesis de que la modularización es una actividad de diseño y la definición de "productos modulares se compone de módulos", definimos el diseño de productos modulares como una "actividad de diseño donde un producto se compone de módulos". El concepto también puede extenderse a los servicios, donde los módulos pueden considerarse como grupos de componentes de servicio que conduce a una función parcial del servicio general o del sistema de servicio del producto (PSS) (Song, Wu, Li, & Xu, 2015).

El diseño modular del producto se puede dividir en tres actividades diferentes y potencialmente complementarias: diseño con módulos, identificación de módulos y diseño de módulos (Liang & Huang, 2002). En la Figura 1 se exponen algunos de los enfoques del diseño de productos modulares.

Diseño de producto modular	Modularización de productos	Diseño de módulos
		Antes-Diseñar grupos de portadores funcionales y definir interfaces
	Modularización de productos	Identificar módulos
		Posteriormente- Agrupar los transportes funcionales existentes en módulos.
	Diseño con módulos	
	Diseño de un producto fuera de módulos existentes-diseño de kit de construcción.	

**Figura 1.** Enfoques de diseño de productos modulares.

El diseño de módulos implica diseñar un producto, al mismo tiempo que se presta atención a grupos de operadores funcionales en módulos y se diseñan sus correspondientes interfaces. Los dos últimos enfoques siguen el mismo objetivo, pero difieren en ese diseño de los módulos, son un enfoque ex ante (es decir, una actividad sintética integrada en el proceso de diseño), mientras que la identificación de módulos es un enfoque ex post (es decir, una actividad analítica accesible en el final del proceso de diseño, criticando un producto existente en el caso de un rediseño).

## **2. DISEÑO MODULAR**

### **2.1. Diseño de módulos**

Dado que la estructuración del producto en módulos es menos una meta en sí misma, que un medio para apoyar objetivos estratégicos de los equipos de desarrollo de productos, se ha utilizado para una amplia gama de propósitos. Puede, por ejemplo, facilitar la gestión de cambios de ingeniería, permitir la flexibilidad del producto en uso o incluso, ayudar a diseñar familias de productos.

## Identificando módulos

Como resultado, el proceso de modularización consiste en agrupar portadores funcionales en módulos que maximizan la similitud dentro del módulo y la independencia entre módulos. Al implementar este concepto, se han propuesto varios métodos similares que incluyen los siguientes elementos:

1. Los datos de entrada para la agrupación de módulos con la utilización de las Matrices de Diseño Estructural (DSM por sus siglas en inglés). Un DSM es una matriz cuadrada, en la que cada elemento representa la interacción entre un par funcional. Al establecer un DSM se requiere, por lo tanto, definir una puntuación en dependencia o similitud, para todos los pares de portadores funcionales.
2. El problema se aborda como un problema de optimización, para el cual, se han propuesto diferentes técnicas, como la programación lineal.
3. La partición del módulo generada por el procedimiento de agrupación es la base para desafiar la arquitectura del producto, es decir, para integrar o separar portadores funcionales y definir las interfaces entre ellos.

## Principios de modularización

Los principios en los que se fundamentan los módulos son los siguientes:

- Agrupar portadores funcionales por material.
- Agrupar portadores funcionales por proceso de montaje.
- Agrupar portadores funcionales por patrón de uso en la familia de productos.
- Grupo funcional de portadores por función.
- Agentes funcionales grupales por requerimientos de mantenimiento.
- Grupo funcional de portadores por patrón de desmontaje.
- Grupo funcional portadores por intervalo post-vida.

Entre las ventajas que ofrece este método, se pueden citar:

- Disminuye la dificultad de ensamblar carteras de productos funcionales.
- Disminuye la dificultad de acoplamiento entre portadores funcionales.
- Disminuye la intensidad del enlace físico de portadores funcionales.
- Disminuye la dificultad de la disyunción de la interfaz.
- Disminuye los riesgos de daños al desmontar dos grupos funcionales.
- Aumenta la usabilidad del diseño, simplificando las interfaces entre transportes funcionales.
- Aumenta la estandarización de la interfaz.

La investigación realizada por Halstenberg y colaboradores (Halstenberg, Buchert, Bonvoisin, Lindow, & Stark, 2015) identificó cuatro pasos necesarios que se deben seguir, para desarrollar la modularidad:

1. Con la ayuda del mapa conceptual de modularización, el equipo de desarrollo de productos, identifica cuáles de sus objetivos estratégicos pueden abordarse a través de la modularidad, los principios de diseño concretos que pueden aplicarse en consecuencia y las métricas que ayudan a seguir la implementación de los principios de diseño correspondientes.
2. Identificar una primera distribución de portadores funcionales en el producto, utilizando la lista de componentes de un producto existente (en caso de rediseño del producto) o utilizando métodos sistemáticos de desarrollo de productos.
3. Evaluar las métricas elegidas en el Paso 1 para cada par de portadores de función identificados en el Paso 2. Esto lleva a la generación de tantas matrices de similitud / dependencia como se elija la métrica.
4. Identificar grupos relevantes de portadores de función, utilizando un algoritmo de agrupamiento. Esto lleva a la proposición de una o más arquitecturas de productos

modulares potenciales, cuya relevancia y cuya viabilidad será evaluada por el equipo de desarrollo del producto.

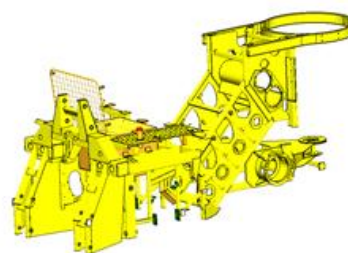
### **Ventajas y desventajas de la modularidad (Borjesson & Sellgren, 2010)**

Estas son algunas de las ventajas de la modularidad: Si se producen fallos, son más fáciles de diagnosticar y remediar (no es necesario identificar la pieza concreta, basta con determinar el módulo y proceder a su sustitución por otro en buenas condiciones); Las reparaciones son más sencillas y rápidas, lo que contribuye a reducir sus costes y los de las tareas de mantenimiento, así como las necesidades de formación de los técnicos dedicados a estas actividades; La planificación y programación del proceso productivo se simplifican, lo mismo que la gestión de los materiales.

Entre los inconvenientes: Destaca la dificultad (e incluso imposibilidad) de desensamblar los módulos, lo cual impide la reutilización de aquellas piezas que no se encuentren dañadas, con el consiguiente coste de materiales para la empresa fabricante y los consumidores, que han de pagar el módulo entero, aunque sólo esté parcialmente dañado; Algunos de los autores especializados en diseño modular insisten en que la clave de un diseño orientado de forma modular es la estandarización de las interfaces entre los componentes, y de los componentes con los usuarios. De este modo el diseño modular permite la mejora de los módulos de manera individual sin tener que modificar parte o todo el resto del diseño. Incluso si hay varias alternativas para un mismo problema (módulo) la generación de todas las alternativas produce productos diversos.

### **3. DESARROLLO DE LAS COSECHADORAS DE CAÑA EN CUBA**

Las cosechadoras de caña, son maquinarias de suma complejidad y de variada gama de componentes y piezas, por eso se dificulta en gran medida su desarrollo y modernismo en nuestro país. Después de muchos años investigando en las mejoras tecnológicas y de eficiencias en las cosechadoras de caña, los especialistas del Centro de Desarrollo de la Maquina Agrícola (CEDEMA) lograron desarrollar la cosechadora CCA-4000 (Figura 3). Es totalmente hidráulizada y con un chasis monolítico, donde son ubicados todos los conjuntos de la máquina, en semejanza con las más modernas máquinas del mundo. Fue fabricada como único prototipo en la fábrica de cosechadoras “60 Aniversario de la Revolución de Octubre”, esto se materializó en el año 2001.



**Figura 3.** Cosechadora de caña CCA-4000 y su chasis.

Para el año 2013, se logró un convenio con la República Popular China y se materializó la fabricación de la cosechadora cañera CCA-5000 (Figura 4), teniendo como base la CCA-4000, con una serie de mejoras sustanciales. De estas máquinas se ha logrado la fabricación de varias de ella, eliminando continuamente las deficiencias detectadas en las pruebas de campo.



**Figura 4.** Cosechadora de caña CCA-5000 y su chasis.

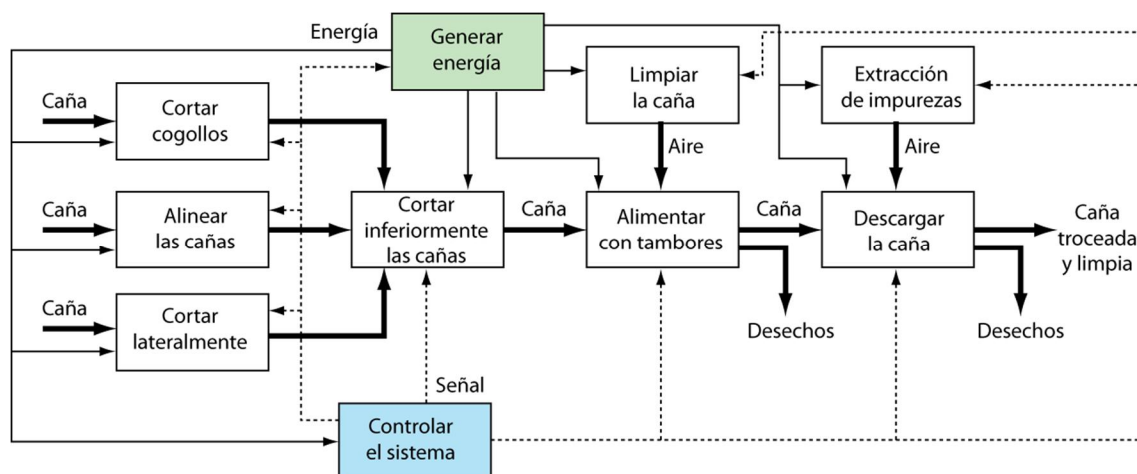
El último desarrollo de esta gama de cosechadoras se fabricó también en China, en el año 2018, con el nombre de CCA-5500 (Figura 5), teniendo como novedad el uso de esteras en vez de neumáticos, para poder cosechar en campos de alta humedad.



**Figura 5.** Cosechadora de caña CCA-5500 y su chasis.

#### 4. ANÁLISIS FUNCIONAL, DSM Y DERIVACIÓN MODULAR

Un análisis funcional primario de las máquinas cosechadoras de caña, se presenta en la Figura 6, donde se aprecias las relaciones funcionales y los diferentes flujos de información, señales y material, entre las funciones (en un primer nivel de análisis funcional).



**Figura 6.** Análisis funcional primario de la cosechadora de caña.

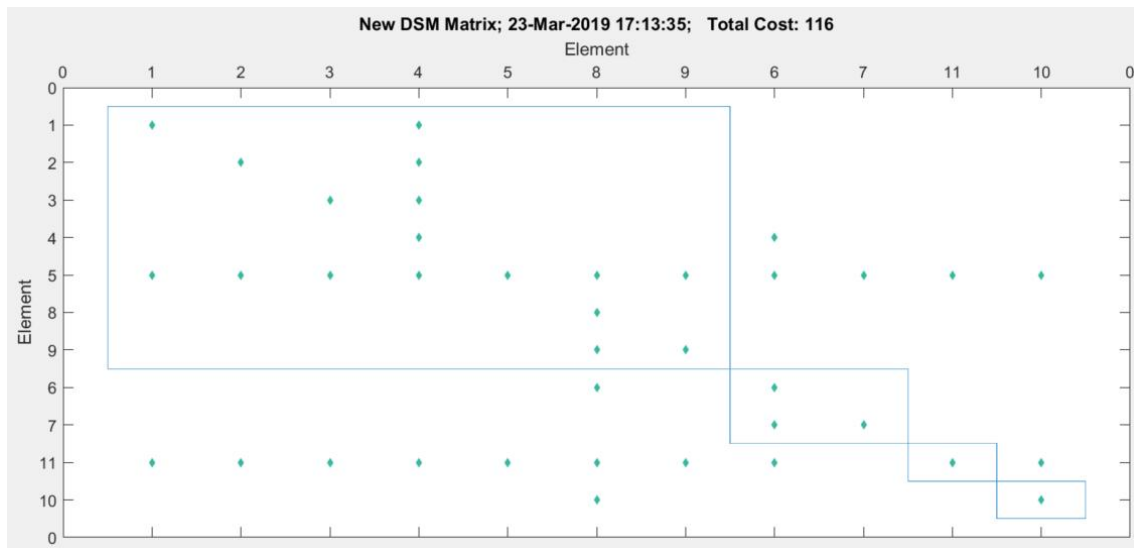


Para desarrollar una matriz DSM primaria, a escala conceptual y teniendo en cuenta la Figura 6, se realiza una codificación de la relación existente entre cada una de las funciones expresadas. Solo se representan las relaciones fundamentales entre cada función. De esta forma se obtienen los vectores siguientes en MatLab:

```
DSM (1,4)=1;
DSM (2,4)=1;
DSM (3,4)=1;
DSM (4,6)=1;
DSM (5,1)=1;
DSM (5,2)=1;
DSM (5,3)=1;
DSM (5,4)=1;
DSM (5,6)=1;
DSM (5,7)=1;
DSM (5,8)=1;
DSM (5,9)=1;
DSM (5,10)=1;
DSM (5,11)=1;
DSM (6,8)=1;
DSM (7,6)=1;
DSM (9,8)=1;
DSM (10,8)=1;
DSM (11,1)=1;
DSM (11,2)=1;
DSM (11,3)=1;
DSM (11,4)=1;
DSM (11,5)=1;
DSM (11,6)=1;
DSM (11,8)=1;
DSM (11,9)=1;
DSM (11,10)=1;
DSM (11,11)=1;
```

```
DSMLABEL{1,1} = 'Cortar cogollos';
DSMLABEL{2,1} = 'Alinear las cañas';
DSMLABEL{3,1} = 'Cortar lateralmente';
DSMLABEL{4,1} = 'Cortar inferiormente';
DSMLABEL{5,1} = 'Generar energía';
DSMLABEL{6,1} = 'Alimentar con tambores';
DSMLABEL{7,1} = 'Limpiar la caña';
DSMLABEL{8,1} = 'Descargar la caña';
DSMLABEL{9,1} = 'Sistema de limpieza';
DSMLABEL{10,1} = 'Extracción de impurezas';
DSMLABEL{11,1} = 'Sistema de control';
```

Una vez definidos estos vectores, se ejecuta la rutina de Clusters en MatLab, que ofrece entre sus salidas, la representación modular de las funciones expresadas en la Figura 6. Como se observa, se delimitan cuatro clusters fundamentales (Figuras 7 y 8).

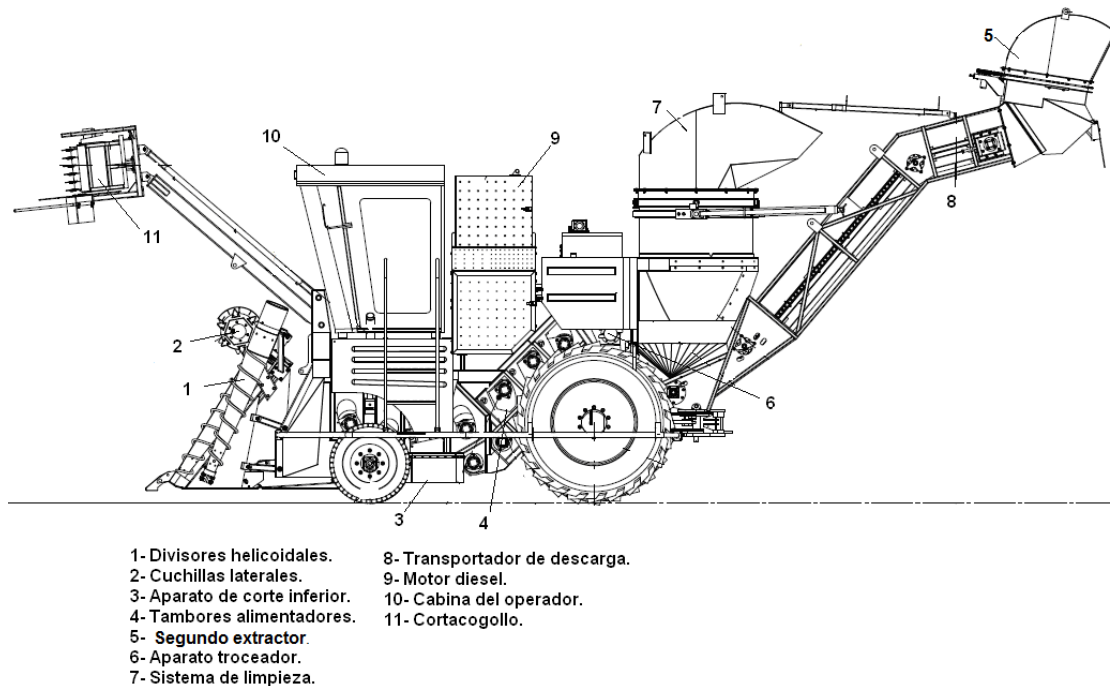


**Figura 7.** Módulos o clusters fundamentales de la cosechadora de caña.

Cluster #1
Cortar cogollos (1)
Alinear las cañas (2)
Cortar lateralmente (3)
Cortar inferiormente (4)
Generar energía (5)
Descargar la caña (8)
Sistema de limpieza (9)
Cluster #2
Alimentar con tambores (6)
Limpiar la caña (7)
Cluster #3
Sistema de control (11)
Cluster #4
Extracción de impurezas (10)

**Figura 8.** Componentes por cada cluster.

Para un análisis preliminar de la modularidad de esta familia de máquinas, y a modo de ejemplificar de manera didáctica, en la Figura 9, se muestran los conjuntos que son compatibles en las tres cosechadoras de caña.



**Figura 9.** Conjuntos que conforman el sistema tecnológico de los tres modelos de cosechadoras de caña.

Como se observa, estas máquinas cosechadoras presentan diferentes chasis, aunque tienen alguna semejanza, esto permite que en el proceso de fabricación se utilice el sistema de modularidad, que hace el proceso de fabricación óptimo, y además facilita la transparencia tecnológica.

## 5. CONCLUSIONES

Se utilizó la técnica de clustering DSM para identificar los candidatos modulares en una representación modular de productos mecánicos. El enfoque propuesto se prueba en el diseño de las cosechadoras de caña de producción nacional. Se demuestra la efectividad del método propuesto.

## 6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bonvoisin, J., Halstenberg, F., Buchert, T., & Stark, R. (2016). A systematic literature review on modular product design. *Journal of Engineering Design*. doi: <http://dx.doi.org/10.1080/09544828.2016.1166482>
- Borjesson, F., & Sellgren, U. (2010, August 25 – 27). *Modularization of novel machines: motives, means and opportunities*. Paper presented at the NordDesign 2010.
- Erixon, G. (1996). *Modular Function Deployment: A Method for Product Modularisation*. Paper presented at the 2nd WDK workshop on product structuring, Delft, Holland. Presentation retrieved from
- Gershenson, J. K., Prasad, G. J., & Zhang, Y. (2003). Product Modularity: Definitions and Benefits. *Journal of Engineering Design*, 14(3), 295–313.
- Halstenberg, F., Buchert, T., Bonvoisin, J., Lindow, K., & Stark, R. (2015, April 7–9). *Multi-Criterial Modularization—Addressing Sustainability Design Goals in Product Modularization*. Paper presented at the 22nd CIRP conference on life cycle engineering, Sydney, Australia.



- Höltkä-Otto, K., Chiriac, N. A., Lysy, D., & Suh, E. S. (2012). Comparative Analysis of Coupling Modularity Metrics. *Journal of Engineering Design*, 23(10-11), 790–806.
- Liang, W.-Y., & Huang, C.-C. (2002). The Agent-Based Collaboration Information System of Product Development. *International Journal of Information Management*, 22(3), 211–224.
- Song, W., Wu, Z., Li, X., & Xu, Z. (2015). Modularizing Product Extension Services: An Approach Based on Modified Service Blueprint and Fuzzy Graph. *Computers & Industrial Engineering*(85), 186–195.

## ACERCA DE LOS AUTORES

**Fernando Expósito-Gallardo.** Ingeniero Mecánico en la especialidad de Mecanizador de la Maquinaria Agrícola por el Instituto Superior Universitario de Maquinaria Agrícola y Eléctrica de la Ciudad de Jarkov, Ucrania. Máster en Maquinaria Agrícola por la Universidad de Holguín. Especialista Superior Mecánico en la actividad de Investigación y Desarrollo de Máquinas Agrícolas en el CEDEMA.

**Guillermo Reyes-Pozo.** Ingeniero Mecánico por la Universidad de Holguín, Cuba. Doctor por la Universidad Politécnica de Cataluña, Profesor Titular del Instituto Químico de Sarria, Barcelona, España. Su labor investigativa está dirigida hacia los procesos de diseño, fabricación y sistemas CAD/CAM/CAE en la industria.

**Roberto Pérez-Rodríguez.** Ingeniero Mecánico por la Universidad de Holguín. Doctor por la Universidad Politécnica de Cataluña, Profesor Titular y Director del Centro de Estudios CAD/CAM de la Universidad de Holguín. Miembro Titular de la Academia de Ciencias de Cuba. Su labor investigativa está dirigida hacia los procesos de diseño, fabricación y sistemas CAD/CAM/CAE en la industria.