

# Planeación de procesos de embutición basada en estrategias de información

**José Roberto Marty Delgado**

Correo electrónico: jmarty@uclv.edu.cu

**Artículo Original**

**Yudieski Bernal Aguilar**

Correo electrónico: yba@uclv.edu.cu

**Alexis Alonso Martínez**

Correo electrónico: alexisam@uclv.edu.cu

Universidad Central Marta Abreu de Las Villas, Cuba

## Resumen

Los procesos de conformación de chapas metálicas representan un grupo significativo de procesos de manufactura de piezas para diferentes aplicaciones. El desarrollo de los métodos de simulación ha creado nuevas posibilidades en importantes aspectos industriales relacionados con la optimización de los procesos de embutición y la integración en sistemas CAPP (planeación de procesos asistida por la computación). En el presente trabajo se resumen las tendencias a considerar en la integración del diseño, la planificación y la optimización en los procesos de embutido de chapas, así como las posibilidades que ofrece esta tarea para el análisis y síntesis de sistemas de ingeniería y en la preparación y toma de decisiones bajo criterios múltiples. Se propone además, una secuencia para la integración del diseño y la planificación del proceso en el análisis de las operaciones de embutición de chapas.

Palabras clave: embutido de chapas, simulación numérica, inteligencia artificial, CAPP, CAE

Recibido: 15 de junio de 2011

Aprobado: 30 de agosto de 2011

## INTRODUCCIÓN

Ampliamente utilizados en las industrias médico-farmacéuticas, biotecnológica y de utensilios electrodomésticos en general, así como en el sector energético, automovilístico y militar, los procesos mecánicos de conformación de chapas metálicas, gozan hoy de una amplia popularidad asociada a su elevada productividad, alta confiabilidad, flexibilidad, bajos costos relativos, bajo consumo de insumos y una alta resistencia mecánica de las piezas en relación con el peso de sus productos terminados.

Los procesos de embutición de chapas, como sistemas interactivos y multicasuales, se consideran afectados por la variabilidad de diversos factores. En el trabajo presentado por Won Bae y colaboradores [1] se obtiene como resultado, un modelo para la determinación de la forma óptima del semiproducto inicial en el embutido de un cuerpo rectangular, empleando chapa de varios aceros inoxidables. Ello permite minimizar la pérdida de material, reducir la fuerza de

conformación e incrementar el valor límite del grado de deformación.

En el trabajo presentado por Ayari [2] con el fin de validar un modelo paramétrico 3D de elementos finitos, construido mediante código estándar ABAQUS/Explícito, se investiga la influencia de los parámetros geométricos del proceso, las propiedades del material y el coeficiente de fricción en la simulación del proceso de embutición de un cuerpo rectangular.

El mayor obstáculo para el mejoramiento de la calidad en cualquier sistema es la variabilidad de las entradas al mismo (variables independientes o entradas) y el cambio constante en las condiciones del proceso. En los procesos de embutición, la calidad de la pieza queda determinada, entre otros factores por la variabilidad en las propiedades del material, el material, cambios geométricos en la herramienta debido al desgaste, variaciones en las condiciones superficiales, holguras, propiedades del material de la herramienta, temperatura, fuerza en el prensachapas,

velocidad del punzón, localización de la herramienta y la rigidez de la prensa.

Hasta el momento, no existe una expresión analítica que describa las relaciones funcionales entre los parámetros tecnológicos del proceso y el dimensionamiento e integración de los elementos constitutivos de la herramienta. Tampoco existen criterios uniformes en cuanto a los elementos a optimizar en la operación. En el presente trabajo se explican las tendencias a considerar en el diseño multicriterial de los procesos de embutido de chapas y las posibilidades que ofrece esta compleja tarea para el análisis y la síntesis de sistemas de ingeniería, en la preparación y toma de decisiones bajo criterios múltiples. Se propone una secuencia de pasos para la concepción de la integración del diseño, la planificación y la optimización del proceso en el análisis de las operaciones de embutición de chapas.

### INFORMACIÓN ASOCIADA AL ANÁLISIS EXTERNO E INTERNO DE LOS PROCESOS DE EMBUTICIÓN DE CHAPAS

La fabricación de piezas por procesos de embutición, se subordina a la tarea general de diseño de tecnologías de fabricación de piezas. Como elementos determinantes de la generación de esta tecnología, se encuentran, la obtención de la forma y dimensiones del semiproducto inicial, el estirado satisfactorio de la pieza y el diseño del troquel para fabricar la pieza.

En la figura 1 se propone el sistema de variables a emplear para el análisis externo de la tarea de ingeniería referida al análisis de los procesos de embutición de chapas. Así, queda definido el conjunto de indicadores cuantificables a optimizar, el conjunto de variables intermedias a restringir y el conjunto de indicadores de carácter subjetivo a evaluar.

En el sistema de variables de la figura 1, se considera además, que en el estirado satisfactorio del semiproducto inicial, hasta lograr la forma final deseada tiene que conciliarse con el diseño del semiproducto, para determinar las dimensiones de este y el efecto de la variabilidad del material, las condiciones de fricción y los esfuerzos para evitar, por ejemplo, la formación de pliegues en la pieza.

En el análisis interno se consideran la modelación matemática, la organización racional de los procedimientos de cálculo y la simulación. La separación del proceso de análisis en dos partes es convencional: una vez realizado el análisis interno, se retorna al externo con el fin de precisar la composición de variables. El proceso de análisis puede requerir de varias iteraciones. Los mejores resultados se alcanzan cuando se interrelacionan con los factores más importantes que condicionan la calidad de las embuticiones.

### PLANIFICACIÓN DEL PROCESO Y ANÁLISIS DE LAS OPERACIONES DE EMBUTICIÓN DE PIEZAS A PARTIR DE CHAPAS

#### Herramientas de inteligencia artificial en la optimización de operaciones de embutido de chapas

La representación matemática de las diferentes piezas embutidas se puede realizar gráficamente, con la asociación de un código a cada una de ellas, por lo que la solución a la tarea de optimización del proceso puede ser realizada por algoritmos del tipo Levenberg–Marquardt o mediante la evolución de poblaciones de códigos (figura 2).

En el trabajo presentado por M. R. Morovvati [3] se propone un sistema genéticamente modificado con red neuronal, como herramienta para la predicción de la forma inicial del semiproducto en relación con la forma final deseada en la pieza.

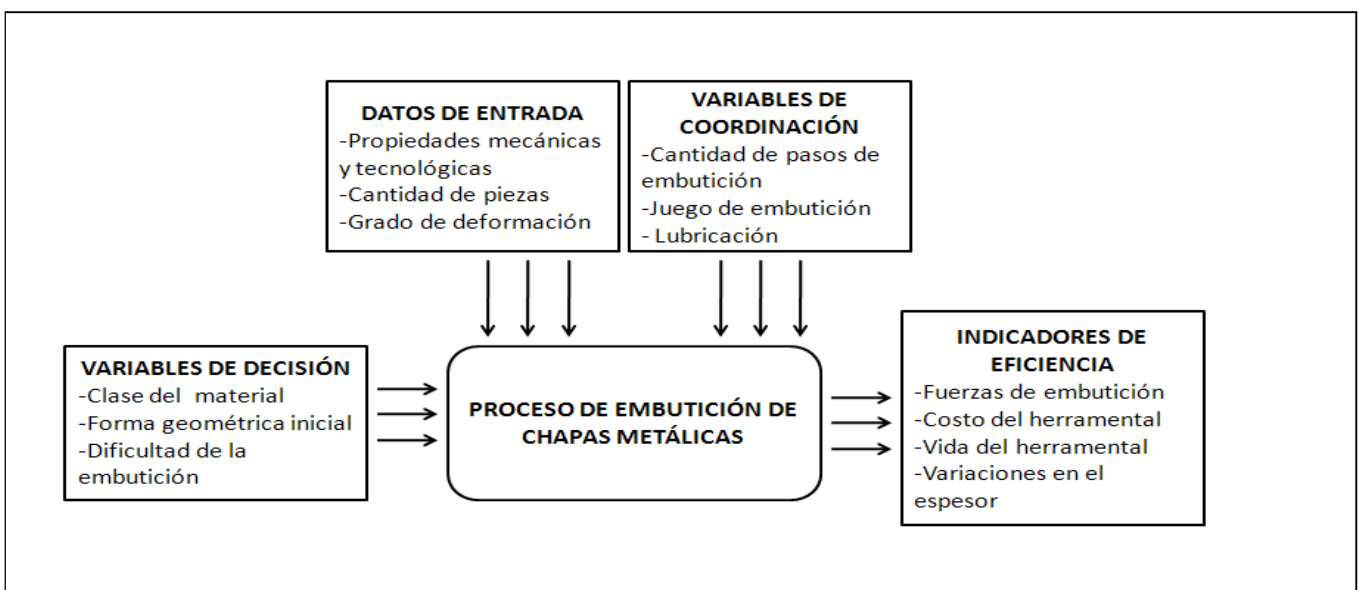


Fig. 1. Información para el análisis externo en la preparación de la toma de decisiones para los procesos de embutición de chapas.

La red neuronal artificial representa la forma final del semiproducto después del proceso de entrenamiento y un algoritmo genético encuentra la forma óptima inicial. El método de elementos finitos se empleó para proveer los datos

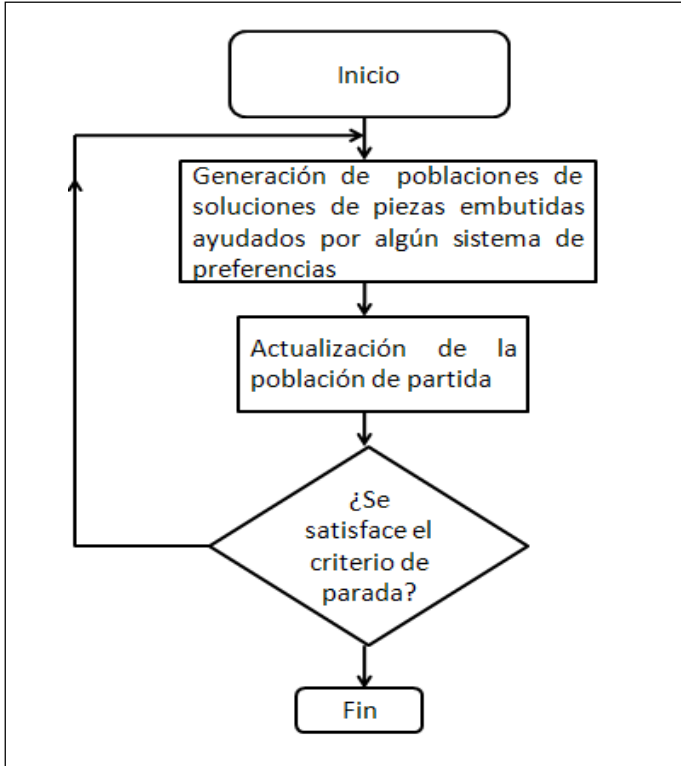


Fig. 2. Método de integración de variables para los procesos de embutición de chapas. Adaptado de [4].

de entrenamiento a la red neuronal.

Sin la aplicación de herramientas de optimización y toma de decisiones, los sistemas CAD no están preparados, conceptualmente, para realizar diseños que se aproximen al mejor compromiso posible entre los indicadores de eficiencia que se muestran en la figura 1. Las herramientas de inteligencia artificial se deben emplear para encontrar las condiciones óptimas de los parámetros del proceso, parámetros geométricos de la pieza o los parámetros de operación de la prensa para la embutición de piezas, en lugar de los tradicionales métodos de prueba y error.

### Planeación de procesos en las operaciones de embutición de chapas

En la literatura científica se pueden encontrar varios enfoques para realizar la planeación, modelación y la optimización de las operaciones de embutido de chapas, por ejemplo, los trabajos presentados por De Carvalho [5] y Tisza. [6] De esos trabajos se puede deducir que la complejidad físico-mecánica de la operación de embutición demanda el uso de las técnicas para su optimización, una posible vía para resolver los problemas se presentan en estos procesos, parte de la representación multiobjetiva,

multicriterial y de la toma de decisiones, sobre las variables que intervienen en el proceso de embutición y su relación con el método de elementos finitos (MEF) en el análisis paramétrico del proceso y las técnicas de Inteligencia Artificial, Redes Neuronales Artificiales (RNA), Algoritmos Genéticos (AG), Sistema Experto (SE), Lógica Difusa (LD), Recocido Simulado (RS) y otras técnicas (por ejemplo, combinación de las anteriores).

En la figura 3 se representa el diagrama de flujo para la planificación de la simulación de proceso en el diseño de troqueles de embutición. El diseño de los elementos activos de la herramienta tiene como objetivo, determinar el número mínimo de operaciones de estampado, y reducir los costos del herramienta manteniendo los criterios de un conformado seguro.

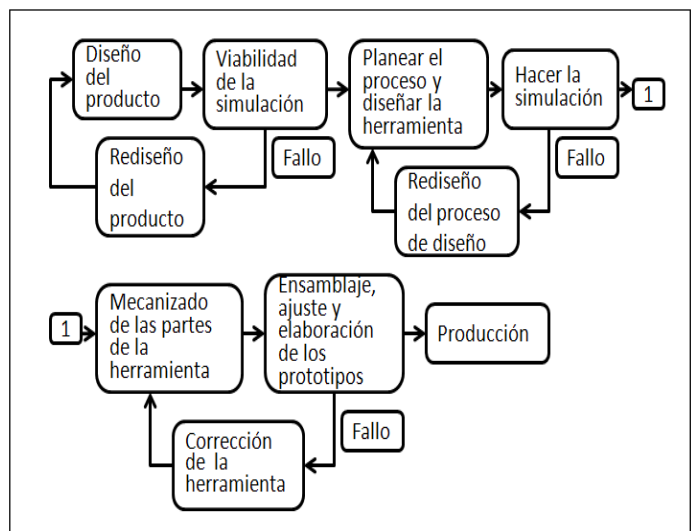


Fig. 3. Diagrama de flujo para planificación de la simulación de proceso en el diseño de troqueles de embutición.

Según los resultados presentados por Lastre [7], nuevos enfoques a los sistemas CAPP han sido estudiados en las últimas dos décadas. Estos enfoques se fundamentan sobre técnicas de modelación geométrica como la planificación de procesos apoyada en características, la planificación de procesos basada en el modelo, la planificación de procesos fundamentada en tablas de características interactivas y la planificación de procesos orientada a objetos (figura 4).

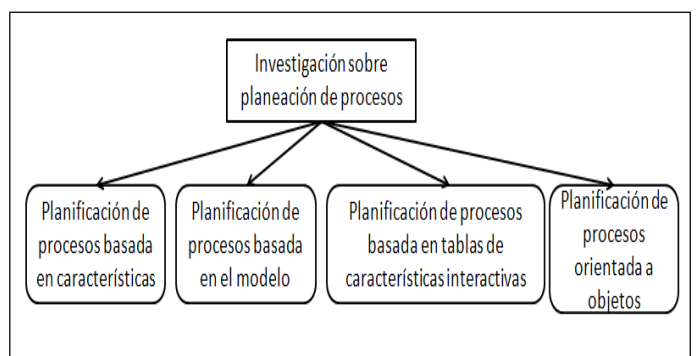


Fig. 4. Principales enfoques sobre planeación de procesos.

## INTEGRACIÓN CAD/CAP/CAE ASOCIADOS A LA EMBUTICIÓN DE PIEZAS Y SU VÍNCULO CON EL CAPP

La planeación de procesos asistida por la computación (CAPP) y el diseño de herramientas han evolucionado como una de las herramientas de ingeniería más importante en el análisis de los procesos de embutición de chapas de chapas. Este desarrollo ha estado íntimamente relacionado con la rápida evolución y el perfeccionamiento de las técnicas de modelación por elementos finitos.

La planificación de procesos para la fabricación de piezas embutidas es una tarea a desarrollar aplicando los principios para la descomposición de procesos complejos y de las tareas de optimización de gran complejidad, en este sentido cabe destacar las contribuciones realizadas por Y. Ledoux [8] utilizando en la planeación la combinación de algoritmos genéticos y el método de elementos finitos, S. kumar [9] proponiendo un sistema basado en el conocimiento para la planeación de procesos de piezas conformadas; así como las contribuciones de Chang [10] y M. Erdbrügge [11] en este campo. Se puede concluir que pueden aplicarse a estos procesos los fundamentos del análisis y la síntesis de sistemas de ingeniería para la preparación y toma de decisiones bajo criterios múltiples, incluidas las decisiones sobre la planeación de procesos de fabricación, como se representa en la figura 5. La tendencia actual en la concepción de la integración del diseño, la planificación del proceso y el análisis de las operaciones de embutido de piezas a partir de chapas es la integración de estas actividades en sistemas basados en la simulación y el conocimiento (KSBS, por sus siglas en inglés), con fuerte vínculo con los sistemas comerciales CAD y de elementos finitos

## ETAPAS PARA LA INTEGRACIÓN DEL DISEÑO, LA PLANIFICACIÓN DEL PROCESO Y LA OPTIMIZACIÓN

Las etapas para la concepción de la integración del diseño, la planificación del proceso y la optimización de las operaciones de embutido de piezas a partir de chapas que se derivan del esquema para la integración CAD/CAP/CAE asociados a la embutición de piezas y su vínculo con el CAPP se resumen a continuación:

### Etapa 1. Descripción del proceso

- Establecer las relaciones cinemáticas del proceso (forma, velocidades, relación de deformaciones, entre la parte deformada y la parte no deformada).
- Establecer los límites de conformabilidad del material, o sea, determinar si es posible ejecutar la operación de conformación sin causar algún defecto de superficie o interno en el material.
- Prever la fuerza y las tensiones necesarias para ejecutar la operación de conformación.

### Etapa 2. Simulación del proceso de embutido de chapas empleando el método de elementos finitos (MEF)

- Definir las variables de entrada con las que se trabajará, forma geométrica, material, parámetros del proceso, diagrama límite de conformado.
- Establecer las condiciones de frontera para cada uno de esos parámetros.
- Definir las variables de salida que interesan.
- Diseñar la simulación para determinar el efecto de la variación de las variables de entrada sobre los indicadores de eficiencia.
- Considerar la influencia del endurecimiento por deformación, la relación de embutición, tipo de lubricante empleado y los diagramas límites de conformación.
- Validación del MEF.

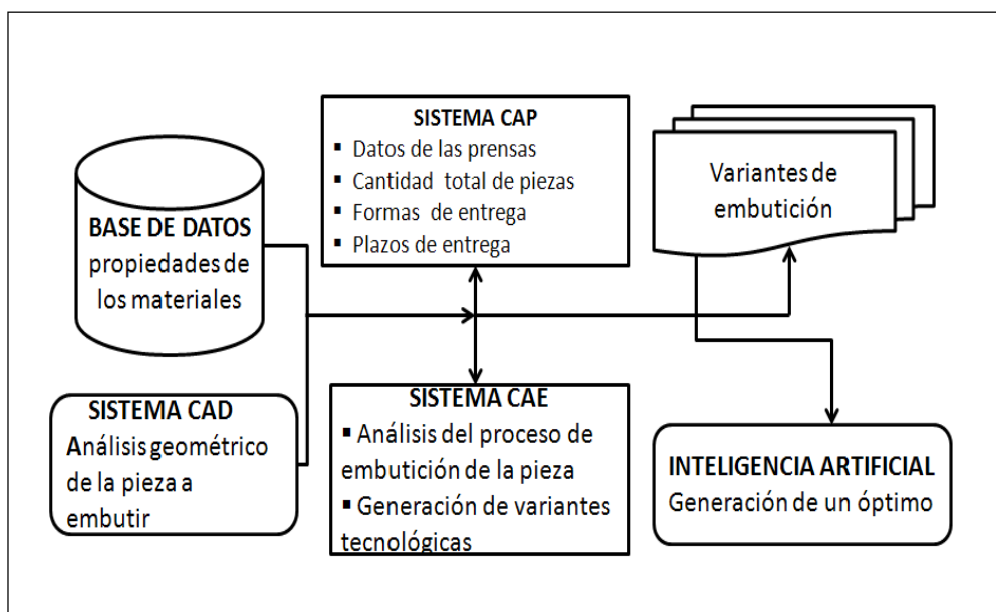


Fig. 5. Esquema de integración de los sistemas CAD/CAP/CAE asociados a la embutición de piezas y su vínculo con el CAPP.

**Etapa 3. Seleccionar de forma apropiada una herramienta de inteligencia artificial para modelar el efecto de las variables de entrada sobre los indicadores de eficiencia**

- a) Selección de las variables a optimizar (indicadores de eficiencia, según figura 1).
- b) Definir los parámetros para la creación y posterior entrenamiento de la herramienta de inteligencia artificial.
- c) Establecer las condiciones de frontera para cada uno de esos parámetros.
- d) Diseñar la simulación para determinar el efecto de la variación de las variables de entrada sobre los indicadores de eficiencia.
- e) Modelar la herramienta de IA para cada indicador de eficiencia seleccionado.
- f) Validación.

**Etapa 4. Comparar los resultados de la simulación por MEF y por IA**

- a) Análisis de la variabilidad de los resultados del MEF y de la herramienta de IA.
- b) Análisis de sensibilidad del método en general.
- c) Correspondencia y validación de las soluciones.

Fue posible aplicar la metodología para el embutido rectangular de una pieza industrial mostrada en la figura 6. Las propiedades del material AISI 304 DDQ y los parámetros propios del proceso utilizados en la validación se resumen en la tabla 1. Se utilizó un algoritmo genético simple, tipo de selección por torneo, elitismo 2 y probabilidad de reproducción 0,8.

Actualmente la obtención de la geometría de la pieza por un proceso de embutición en un solo paso demanda una fuerza máxima de 200 KN. Aplicando la metodología se obtuvo una fuerza máxima de 340 KN, lo que representa un 16,94% de reducción en la fuerza máxima. Trabajando con una prensa de mayor capacidad se obtienen defectos tales como las arrugas y grietas en las piezas.

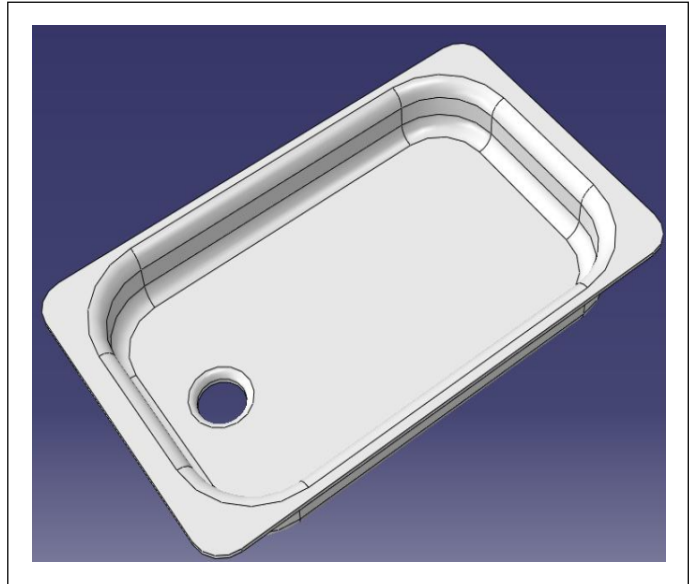


Fig. 6. Modelo CAD de la pieza embutida. Las dimensiones principales se presentan en la tabla 1.

**CONCLUSIONES**

1. Los nuevos requerimientos y desarrollos más importantes relacionados con la simulación de los procesos de embutido de chapa están asociados a la información para la toma de decisiones, relacionando entre otros, la geometría y el material de la pieza, el diseño de las herramientas y las condiciones tecnológicas en las que se realiza la operación.
2. La tendencia actual del desarrollo en las estrategias de optimización para la planeación de procesos de embutición de chapas es la integración de procesos basada en el conocimiento y la información asociada al proceso. Las etapas descritas se aplicaron con éxito en el embutido rectangular de una pieza industrial, y fue posible obtener reducciones en los valores de fuerza máxima de hasta un 16,94 %.

**REFERENCIAS**

1. BAE, Won and HO YOON, Kim. "Experimental Determination of the Optimum Blank Shape in Rectangular Cup Drawing". *International Journal of the Korean Society of Precision Engineering*, 2003, vol. 4, núm. 1, pp. 5-8.
2. AYARI, Fayza; LAZGHAB, Tarek. "Parametric Finite Element Analysis of square cup deep drawing". *Archives of Computational Materials Science and Surface*. 2009, vol. 1, núm. 2, pp. 106-111.

| Tabla 1<br>Propiedades del material, parámetros geométricos y del proceso empleados |              |
|---|--------------|
| Relación de Poisson ( $\nu$ )   | 0,30         |
| Parámetro de endurecimiento (n)   | 0,244        |
| Límite de proporcionalidad (K)  | 540 (MPa)    |
| Coeficiente de Lankford (r)   | 0,906        |
| Tensión máxima  | 582(MPa)     |
| Parámetros geométricos y del proceso  |              |
| Coeficiente de rozamiento   | 0,11         |
| Dimensiones iniciales de la chapa   | (800X625) mm |
| Espesor inicial de la chapa   | 0,6 mm       |
| Dimensiones copa rectangular embutida   | (558X358) mm |
| Altura máxima/mínima de la copa rectangular embutida                                | 125/102 mm   |
| Radios de redondeos bordes superiores   | 12 mm        |
| Radios de redondeos fondo   | 30 mm        |

3. **MOROVVATI, Mohammad and MOLLAEI DARIANI, Bijan.** "Initial Blank Optimization in Multilayer Deep Drawing Process Using GONNS". *Journal of Manufacturing Science and Engineering*. 2010, vol. 132, núm. 6, pp. 10.
4. **ARZOLA, José.** *Sistemas de Ingeniería. Preparación y toma de decisiones de ingeniería bajo criterios múltiples*. Ciudad de La Habana: Editorial Felix Varela, 2009. pp.104, ISBN 978-959-261-299-0.
5. **DE CARVALHO, Raquel and VALENTE, Robert.** "Optimization Strategies for Non-Linear Material Parameters Identification in Metal Forming Problems". *Computers and Structures*. 2011, vol. 89, núm. 1-2, pp. 246-255.
6. **TISZA, Miklós and LUKÁCS, Zsolt.** "Integrated Process Simulation and Die-Desing in Sheet Metal Forming". In International Conference of Deep-drawing Research Group IDDRG, 2007.
7. **LASTRE, Arlys.** "Optimización de la distribución y corte de piezas de forma geométrica irregular en chapas". Director: Alexis Cordovés García. Tesis de Doctorado, Universidad de Holguín Oscar Lucero Moya, Holguín, 2010.
8. **LEDOUX, Yann and SÉBASTIAN, Patrick.** "Optimization Method for Stamping Tools Under Reliability Constraints Using Genetic Algorithms and Finite Element Simulations". *Journal of Materials Processing Technology*, 2010, vol. 210, núm. 3, pp. 474-486.
9. **KUMAR, Shailendra and SINGH, Rajander.** "CCKBS: A Component Check Knowledge-Based System for Assessing Manufacturability of Sheet Metal Parts". *Journal of Materials Processing Technology*, 2006, vol. 172, núm. 1, pp. 64-69.
10. **CHANG, Hsu; YANKWANG, Chen.** "Neuro-Genetic Approach to Optimize Parameter Design of Dynamic Multiresponse Experiments". *Applied Soft Computing*, 2011, vol. 11, núm 1, pp. 436–442.
11. **ERDBRÜGGE, Martina and KUHN, Sonja.** "Joint Optimization of Multiple Responses based on Loss Functions, TU Dortmund University, 44221. Germany, 2011. 30pp.

## AUTORES

### José Roberto Marty Delgado

Ingeniero Mecánico, Doctor en Ciencias Técnicas, Profesor Titular, Departamento de Ingeniería Mecánica, Facultad de Ingeniería Mecánica Universidad Central Marta Abreu de Las Villas (UCLV), Villa Clara, Cuba

### Yudieski Bernal Aguilar

Ingeniero Mecánico, Asistente, Departamento de Ingeniería Mecánica, Facultad de Ingeniería Mecánica, UCLV, Villa Clara, Cuba

### Alexis Alonso Martínez

Ingeniero Mecánico, Asistente, Departamento de Ingeniería Mecánica, Facultad de Ingeniería Mecánica, UCLV, Villa Clara, Cuba

## Planning of Sheet Metal Drawing Processes Based on Information Strategies

### Abstract

Sheet metal forming processes represent an important group of manufacturing processes for dissimilar applications. The development of numerical simulation methods has created new possibilities in important industrial aspects with regard to optimization and integration CAPP system in sheet metal drawing processes. The result of the processes depends on a large number of parameters and their interdependence hence, knowledge and experience of the designer are critical. The present work deals with the elements to be considered in the integral design, planning and optimization sheet metal drawing processes under a set of criteria and as such the possibilities that this task offers in the decision making, preparation along with the analysis and synthesis of engineering systems. In addition a methodology for integration design and process planning of sheet metal forming process analysis is summarized.

Key words: sheet metal drawing, numerical simulation, optimization, artificial intelligence, CAPP, CAE