

1. Introducción

Existe una tendencia en el campo del desarrollo de producto a apearse aquellas tecnologías, materiales y procesos que han dado los mejores resultados en el pasado. Esta tendencia es aceptada en campos como la arquitectura, el diseño artístico o de autor, siendo el uso repetitivo de un material y un proceso de generación determinado, el sello característico del diseñador, sin embargo en el campo de la ingeniería del diseño se requiere un enfoque de mayor apertura hacia la adopción de nuevos materiales y procesos que permitan características innovadoras. De hecho gran parte de la evolución constante en el campo del diseño se debe a la continua aparición de nuevos materiales y procesos de fabricación (Ashby 2005).

No obstante, dada la gran cantidad de opciones para fabricación y el amplio abanico de materiales y sus propiedades, es difícil realizar un seguimiento y sobre todo mantenerse actualizado sobre las últimas opciones disponibles. Este es el caso de Rapid Manufacturing (RM). Mientras para la comunidad técnica de RM es sencillo distinguir entre los materiales y las prestaciones de sus diferentes tecnologías, para un número considerable de ingenieros y diseñadores, sus funcionalidades han pasado inéditas durante los últimos 20 años (Kruf, 2008). La figura 1 muestra los resultados de un estudio realizado principalmente entre diseñadores industriales sobre su conocimiento y dominio en procesos de fabricación en general (Boothroyd et al. 1994). Las respuestas negativas son mostradas en negro mientras que las respuestas positivas, que denotan un grado de conocimiento significativo, se muestran en blanco. Los resultados podrían interpretarse como la concentración de un mayor conocimiento y/o experiencia en un reducido número de tecnologías (moldeo de inyección, extrusión de metales, etc.) mientras que existe un conocimiento limitado de un amplio rango de tecnologías.

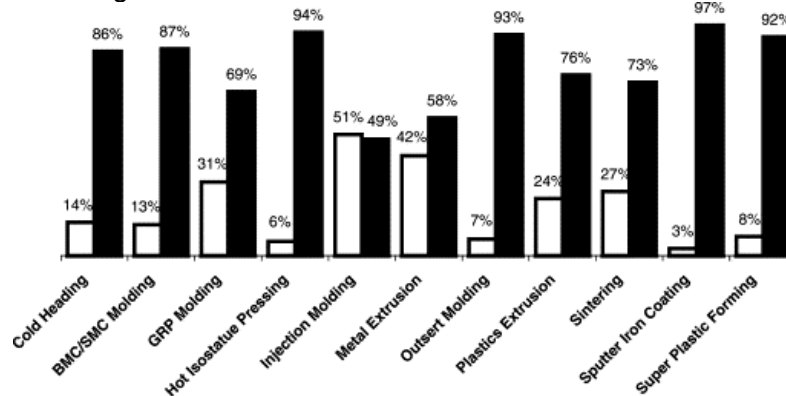


Figura 1. Estudio sobre dominio de procesos de fabricación: (blanco) dominio suficiente; (negro) poco/ninguno

Una herramienta eficiente para paliar este rezago es el uso de sistemas KBE (Knowledge Based Engineering) los cuales están orientados a dar soporte principalmente durante los procesos de análisis y selección de procesos de fabricación en las primeras etapas de desarrollo del producto.

1.1 Sobre los sistemas KBE

Los sistemas KBE son cada vez más aceptados especialmente en ambientes académicos aunque en menor medida en entornos industriales. Un ejemplo de éxito es el selector 'Cambridge Materials and Process selector' (GRANTA 2007) el cual incorpora una base de datos extensa vinculada a procesos de fabricación compatibles, indicando sus principales parámetros, aplicaciones y propiedades físicas. Este sistema utiliza el popular

método introducido por el Dr. Ashby (2005) para realizar una filtración iterativa de materiales mediante gráficas de parámetros a distintos niveles, hasta encontrar la combinación material/proceso más adecuada según los requerimientos funcionales de la pieza. Otro sistema ampliamente difundido es el software DFMA (Dewhurst, 2007) que además del clásico análisis de fabricación y ensamble (DFMA) incorpora una base de datos extensa asociada a información de procesos además de un módulo de análisis de costes basado principalmente en un estudio económico de las operaciones de ensamble. Este es un ejemplo de sistema KBE con una interface de usuario amigable para realizar análisis de productos complejos, tales como: morfológicos, de complejidad, factores de tolerancia, fabricabilidad, etc.

Existe sin embargo, un amplio historial de sistemas independientes no-comerciales desarrollados para resolver dificultades puntuales en el ámbito de la fabricación. Un ejemplo es el sistema COMPASS (Giachetti, 1998) que además de funcionar como un selector de procesos de fabricación, permite estudiar aspectos como la complejidad del diseño del producto, características funcionales así como limitaciones de fabricabilidad, creando un ranking final de procesos para guiar al diseñador en la elección más adecuada de la tecnología. Dado el ritmo de avance actual de las tecnologías de fabricación, se espera que aproximadamente un 75% de diseñadores e ingenieros del producto utilice en los próximos años algún tipo de herramienta KBE como ayuda para la toma de decisiones (Bernard 2003).

1.2 Sobre Rapid Manufacturing

Rapid Manufacturing (RM) se refiere a aquellas tecnologías capaces de producir no solo prototipos si no piezas finales directamente desde un fichero, generalmente en formato .STL modelado en algún software CAD. RM se basa en un principio de deposición aditivo, esto es, las piezas son generadas a través de la deposición sucesiva de finas capas de material (polímeros, metales, resinas foto-poliméricas, entre otras) con un espesor de capa de alrededor 0.01mm mediante diferentes tecnologías como laser, rayos UV, deposición selectiva por cabezales mecánicos, foto-exposición, entre otros. Las tecnologías del Rapid Manufacturing más comunes incluyen: Estereolitografía (SLA), Sinterizado Selectivo Láser (SLS), Deposición de hilo fundido (FDM), Sinterizado Láser Metálico (DMLS) y otras derivadas como Fundido Selectivo Láser (SLM) o Fundido por Haz de Electrones (EBM).

La selección del proceso más adecuado para una aplicación determinada dependerá de factores tales como: volumen de trabajo disponible, precisión, tipo de material, velocidad de deposición así como otros parámetros internos del equipo. Actualmente el número de fabricantes de diversas tecnologías de RM supera los 25 los cuales en conjunto comercializan entre 40 y 60 diferentes modelos de equipos (Wohlers, 2006); debido a este elevado número de alternativas de fabricación desde mediados de los noventa se han introducido sistemas asistidos por ordenador para la comparación y selección de dichas tecnologías. A continuación se describen las más significativas.

2. Sistemas previos para selección de procesos de RM

Uno de los primeros intentos de desarrollar un sistema de selección de procesos de RM, o Rapid Prototyping (RP) ya que en sus inicios sólo eran utilizados para generar prototipos) fue introducido por Hornberger (1993) con un enfoque diseñado para asistir en la selección de procesos en entornos académicos. Muller (1996) introdujo un sistema similar basado en el principio de bases de datos relacionales, mientras que Campbell y Bernie (1996), utilizaron esta misma técnica aplicando el llamado "análisis coste beneficio" destinado a identificar el mejor ajuste entre las capacidades de los procesos de RP y las especificaciones de la pieza (sección mínima, forma primitiva, presencia de hoyos pasantes, formas reentrantes, etc. Los primeros sistemas expertos basados en conocimiento

aparecieron posteriormente con Bibb (1999) and Masood (2002) quienes idearon un sistema KBE basado tanto en datos obtenidos de encuestas y estudios presenciales con expertos así como a partir de sus propios experimentos con equipos de RP.

Los sistemas introducidos más recientemente, además de incluir un procesamiento lógico más complejo incorporan interfaces avanzadas o basadas en plataformas web. Un sistema recientemente lanzado mediante una plataforma web fue propuesto por la Asociación Española de Rapid Manufacturing (ASERM, 2006) el cual además de incorporar procesos aditivos incluye una sección de análisis exhaustivo sobre tecnologías de Utillajes Rápidos. Sin embargo a pesar de que estos métodos contienen una lógica adecuada para la selección de procesos de RM, existen algunas desventajas que condicionan su uso:

- 1) Todos los sistemas anteriores realizan la comparación, análisis y ranking de procesos basados en comparaciones internas, es decir, entre los mismos procesos de RP en vez de realizar comparaciones con procesos convencionales de fabricación.
- 2) En los sistemas mostrados no se utilizan bases de datos con propiedades de materiales de RM, es decir no se incorpora en el análisis las capacidades y prestaciones mecánicas, físicas, etc., de las opciones reales de fabricación.
- 3) Algunas propiedades usualmente críticas en problemas de diseño comunes, no son incluidas en estos sistemas tales como: propiedades térmicas, mecánicas, funcionales (desgaste, abrasión, conductividad, etc.)
- 4) En ningún sistema previo se realiza un análisis económico, es decir no se utilizan modelos para estimación de costes de pieza y la comparación entre ellos para mostrar un análisis completo al usuario.

Este trabajo propone un sistema concurrente para la selección de procesos de Rapid Manufacturing el cual incorpora un sistema experto, un motor de inferencia basado en lógica difusa, así como un sistema de bases de datos relacionales de forma que a partir de datos cualitativos y cuantitativos entregados por el usuario se realiza un análisis completo sobre la viabilidad técnica, económica y funcional de los procesos de RM.

3. Arquitectura del sistema RMADS

Este sistema denominado RMADS por sus siglas en inglés (Rapid Manufacturing Advice System) está orientado al análisis de procesos alternativos de fabricación desde las primeras etapas del desarrollo de productos. El sistema integra una base de conocimiento basada en estudios de usuarios, centros de ingeniería y servicios de forma que se puedan captar las preferencias y prácticas comunes entre usuarios experimentados de RM (Munguía, 2007). Su arquitectura se compone de 3 módulos trabajando de forma concurrente para la toma de decisiones:

- Módulo de requerimientos funcionales
- Módulo de análisis de costes
- Módulo de selección de materiales

A continuación se define la estructura interna e integración de estos módulos.

3.1 Módulo 1. Requerimientos funcionales

El modelo está basado en una arquitectura orientada a objetos, es decir, es capaz de trabajar con módulos independientes activados individualmente según las preferencias del usuario.

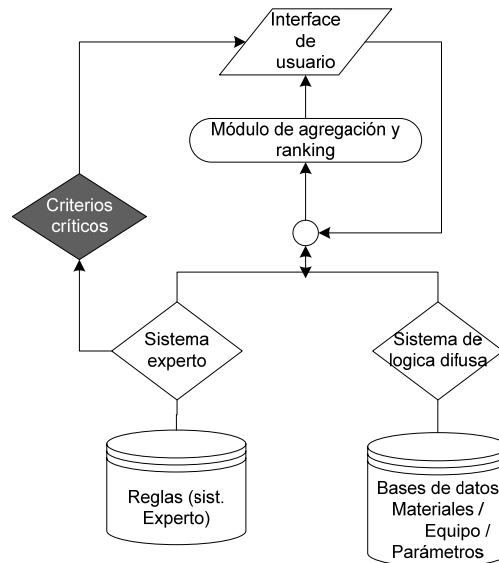


Figura 2. Arquitectura del Módulo 1: Requerimientos funcionales

Elementos del sistema

• **Interface del sistema:** La interface de usuario acepta dos tipos de información: numérica y lingüística. Los valores numéricos se refieren a información cuantitativa introducida directamente por el usuario a partir de las medidas de la pieza, mientras que el otro tipo se refiere a características cualitativas a ser elegidas de una lista pre-definida de atributos de tres niveles. Por ejemplo el parámetro 'Acabado superficial' puede tener los atributos (Bueno /regular /Poroso). En total existen 20 opciones de entrada cada una de las cuales se convierte en un vector con una longitud equivalente al número de procesos de RM almacenados en la base de datos. Cada vector es normalizado en el intervalo [0 -1].

• **Sistema experto y lógica basada en reglas:** Dentro del sistema las reglas de selección son representadas mediante la lógica IF-THEN-ELSE. Un total de 500 reglas son ejecutadas cuando todas las opciones del menú de usuario son activadas, sin embargo el número de reglas puede variar según sean o no activadas por el usuario. Este módulo se ha implementado para gestionar información cuantitativa.

• **Sistema de inferencia basado en lógica difusa:** La función de este modulo es traducir la información cualitativa o imprecisa a 'conjuntos difusos' mediante el mapeo de las funciones de membrecía pre-definidas con los valores especificados por el usuario. Para cada parámetro (por ejemplo: acabado superficial, tolerancias, propiedades mecánicas, etc.) el usuario seleccionará una de tres opciones presentadas por ejemplo (alto / promedio/ bajo).

• **Bases de datos:** El sistema utiliza dos tipos principales de bases de datos:

- Parámetros de procesos de RM
- Materiales por tipo, fabricante y proceso

La información para la base de datos ha sido recabada a partir de información técnica de fabricantes, distribuidores y fuentes relacionadas, CASTLE-ISLAND, 2007; Granta, 2007). Esta información ha sido almacenada en una base de datos de Ms Access y llamada a través de subrutinas por el sistema RMADS construido con el módulo GUI de Matlab 2007.

• **Módulo de procesamiento y ranking:** Este modulo genera la decisión final basada en parámetros y opciones seleccionadas por el usuario. Dado que la información cuantitativa es normalizada en el rango [0-1] y la información cualitativa es traducida a números difusos, la función de este módulo es generar una decisión basada en ambos criterios. Aunque existen diferentes técnicas para realizar un ranking de conjuntos difusos,

especialmente aquellos basados en máximos-mínimos, para este sistema se adoptó el método de transformación (Lan, 2005) basado en la normalización y agrupación de los vectores generados, ya que mostró mejores resultados. La siguiente figura muestra la interface de usuario desarrollada en Matlab donde se integran los métodos descritos.

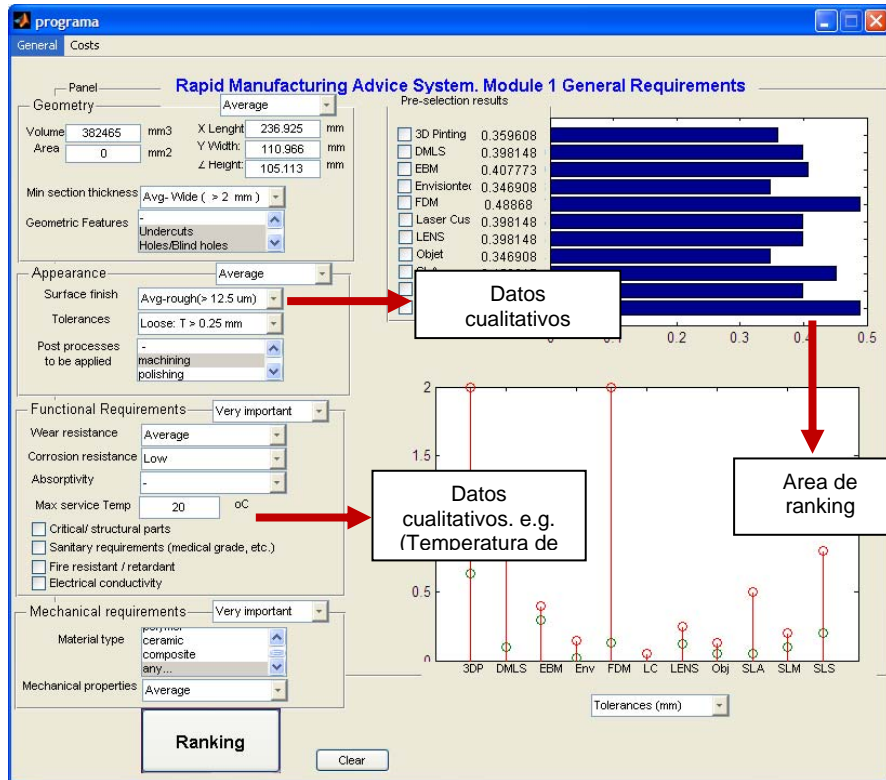


Figura 3 Interface gráfica del Módulo 1

Módulo 2. Estimación de costes

Una vez que se ha ejecutado el Módulo anterior, es posible activar el módulo de estimación de costes el cual está basado en un arreglo de redes neuronales y en modelos para métricos de estimación. Ambos modelos tienen ventajas y desventajas; los modelos paramétricos tienen un mayor nivel de precisión para realizar estimaciones sin embargo se requiere conocer previamente un mayor número de parámetros con exactitud. En el caso de estimación de costes de piezas se requerirán parámetros como: medidas, volumen, densidad del material, parámetros de fabricación, etc. El sistema RMADS incorpora modelos paramétricos desarrollados por Ruffo (2006) y Wilson (2006).

Por otra parte los sistemas de estimación basados en redes neuronales hacen uso de la capacidad de 'recuerdo y generalización' de manera que a partir de un número de casos de ejemplo (conjunto de entrenamiento) se puedan extrapolar las estimaciones a nuevos casos. Para este proyecto se extrajeron datos de costes de 130 piezas mecánicas, de forma que esta estimación sirva de base a nuevos productos. La siguiente figura muestra un esquema general del procedimiento para cálculo de costes.

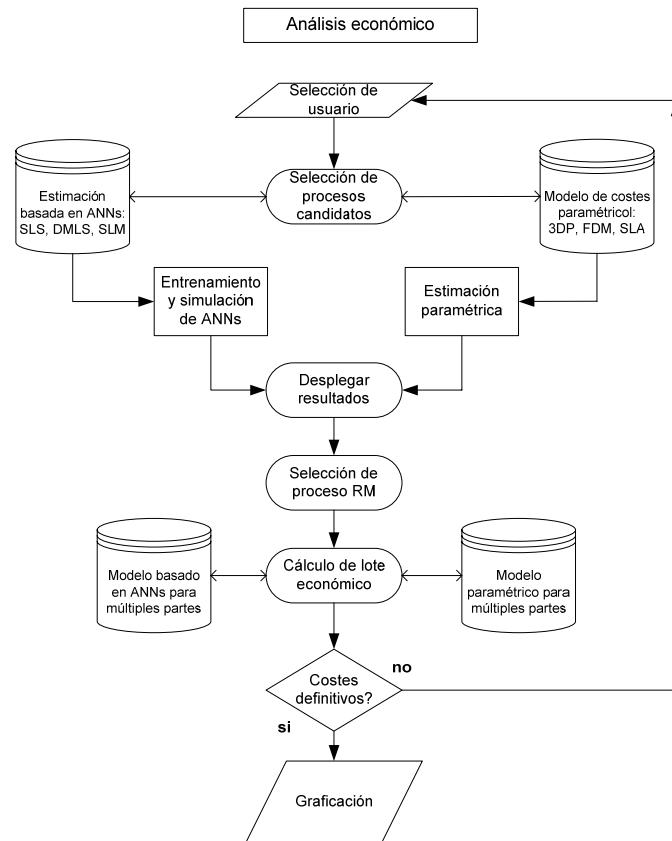


Figura 4. Esquema general del módulo de estimación de costes

Módulo 3. Selección de materiales

Para desarrollar una aplicación KBE para la selección de materiales fue necesario realizar una recopilación exhaustiva de fuentes de información, incluyendo datos de fabricantes, centros de servicio así como otras fuentes especializadas (Wohlens 2006; CASTLE-ISLAND 2007). La base de datos resultante ha sido almacenada en Ms, Access, ya que facilita la consulta de datos a partir de Matlab y su gestor de consultas a bases de datos ODBC (Open Data Base Connectivity). Esto implica algunas ventajas entre ellas:

- Nuevos registros de materiales pueden ser añadidos, actualizados automáticamente y recuperados a partir de llamadas ODBC a partir de módulos individuales de Matlab.
- Nuevas propiedades de materiales pueden ser añadidas haciendo fácil añadir restricciones adicionales a las interfaces de usuarios.
- Los datos almacenados en Ms Access pueden ser fácilmente exportados a otro software que permitan graficado como MS Excel.

Sin embargo la principal dificultad asociada a la generación de bases de datos de materiales para Rapid Manufacturing es la carencia de datos. Mientras que algunas propiedades mecánicas como Resistencia a la tensión, elongación o módulo de elasticidad son conocidas en un 75-90% de los materiales, otras propiedades como térmicas, estéticas o magnéticas son conocidas en menos del 5% de estos materiales.

El módulo de selección de materiales cuenta de igual forma con un sistema experto independiente, de forma que múltiples propiedades puedan ser seleccionadas y se filtren todos aquellos materiales que no cumplen con los requerimientos funcionales de la pieza. La siguiente figura muestra la recuperación de datos a través de ODBC en Matlab para filtrar propiedades de materiales.

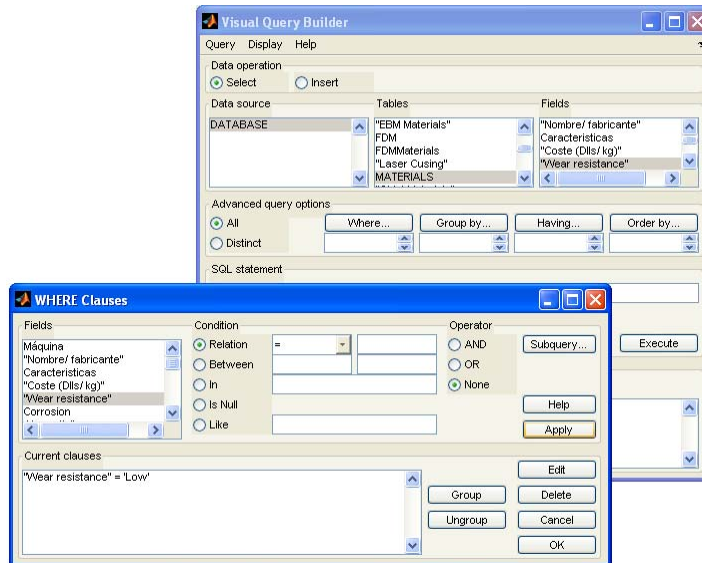


Figura 5. Pantalla de llamada ODBC en Matlab.

El siguiente caso de estudio muestra la aplicación coordinada de los diferentes módulos que componen el sistema RMADS. El resultado esperado no es un listado con los procesos de RM ganadores sino una serie de criterios de fabricación que ayuden al diseñador /ingeniero a tomar las decisiones más adecuadas:

4. Caso de estudio

Se requiere diseñar una máquina clasificadora de monedas que funciona a través de un principio de clasificación electro-magnético, por tanto la mayoría de los componentes internos, que están en contacto con las monedas habrán de ser plásticos. El sistema global mostrado en la figura 6, está compuesto por una banda transportadora interna que contiene 'eslabones' individuales. Estas son piezas independientes que se unen entre sí por fricción, cuya función es contener y guiar a las monedas dentro de la máquina.

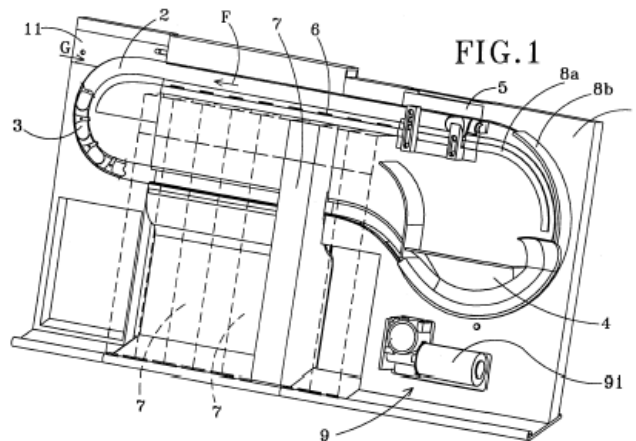


Figura 6. Esquema general de la máquina clasificadora de monedas. Patente ES 2158803 (UPC, 2001)

Dado que sólo se requiere construir una máquina prototipo y en caso de industrializarse se requerirían alrededor de 500 unidades anuales, se investiga la posibilidad de sustituir el costoso proceso de moldeo por inyección y fabricar algunos de los componentes por medio de Rapid Manufacturing.

Uno de los elementos a analizar son los eslabones, ya que además del material originalmente pensado: Poliamida 66, la pieza requiere formas geométricas complejas con

reentrantes acanalados, lo que aumenta los costes de moldes de inyección. Algunos requerimientos funcionales incluyen:

- Alta precisión dimensional
- Peso ligero
- Material auto-deslizante
- Alta Resistencia mecánica en general
- Material no- conductor
- Alta Resistencia al desgaste y corrosión

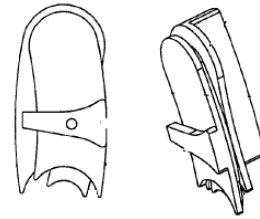


Figura 7. Imagen del “eslabón” interno del equipo

Las figuras 8, 9 10 ilustran la aplicación de los diferentes módulos del sistema para el análisis de viabilidad para usar RM como sustituto de medios convencionales de producción:

Módulo 1. Requerimientos generales de diseño

Esta interface permite al usuario introducir aspectos Geométricos (medidas, volumen, formas), Estéticos (acabados, tolerancias, post-procesos) y funcionales (propiedades mecánicas, desgaste, absorbencia, etc.) de forma que pueda realizarse una criba preliminar de aquellos procesos de RM que son viables para la pieza. En el caso de los eslabones puede observarse como las preferencias de usuario han llevado a la eliminación de aquellos procesos que no son capaces de trabajar con termoplásticos, mostrando solo aquellos que en teoría cumplen con la primera fase de requerimientos mínimos.

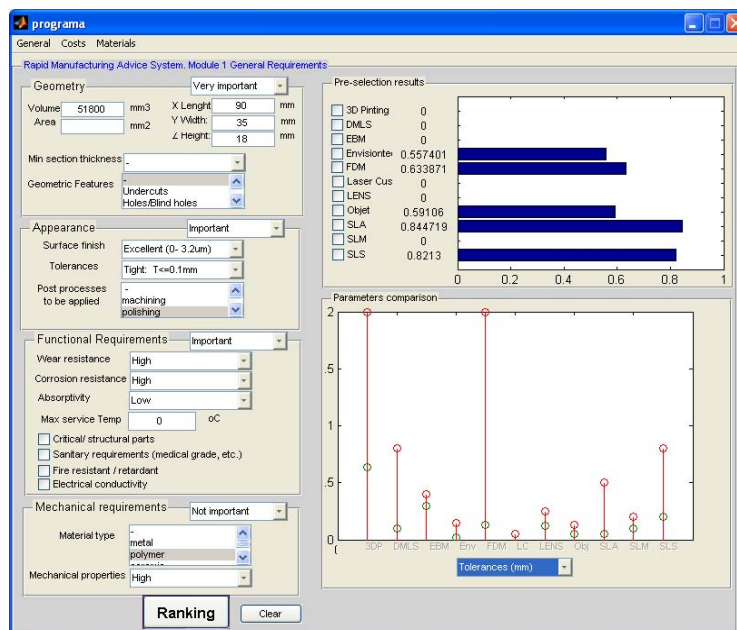


Figura 8. Captura de pantalla del módulo de requerimientos generales

Módulo 2. Análisis de costes

Este módulo realiza estimaciones basadas en modelos de redes neuronales (SLS, SLM, DMLS) y paramétricos (FDM, SLA) con datos extraídos a partir de las dimensiones de la pieza y el tamaño de lote requerido. En la captura de pantalla mostrada las barras

corresponden al cálculo de coste por pieza, mientras que la gráfica inferior es una gráfica extendida de punto de equilibrio económico entre los procesos seleccionados. El sistema muestra a las tecnologías FDM y SLS como las más factibles económicamente dado el coste por pieza; de igual forma esto confirma a ambos procesos como opciones viables técnica y económicamente. Sin embargo es necesario comprobar las propiedades de materiales.

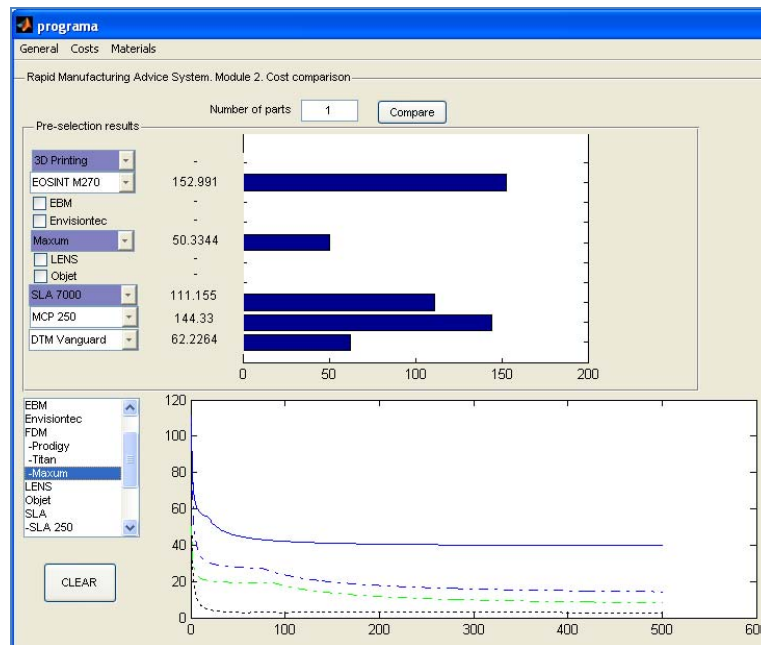


Figura 9. Captura de pantalla del módulo de estimación de costes

Módulo 3. Selección de materiales

Los requerimientos especificados para la pieza indica altos niveles de resistencia al desgaste, corrosión y un nivel bajo de absorción que debilite las propiedades de la pieza con el tiempo. Un primer filtrado de la lista de materiales arroja alrededor de 20 resultados, por lo que se requiere un refinamiento del criterio de selección. Para ello se activa la zona de gráficos (zona superior-derecha de la pantalla) y se elige la gráfica desgaste-resistencia a la tensión dado que ambas son propiedades críticas. El módulo de selección de materiales hace un llamado a la base de datos para extraer estas propiedades; gracias a este análisis es posible observar como los primeros 5 materiales corresponden a poliamidas con distintos grados de formulación, propias del proceso SLS.

Aunque es posible refinar mayormente los criterios de selección, es claro que el principal proceso candidato es el Sinterizado Selectivo Laser; de igual forma gracias al este análisis se conocen las estimaciones preliminares de costes para distintos volúmenes de producción, así como las propiedades de los materiales más adecuados para la tarea.

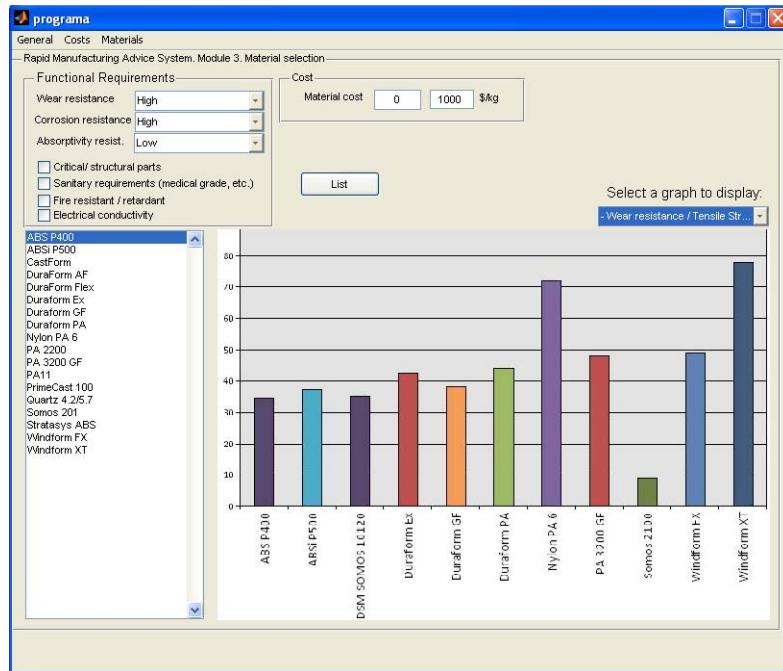


Figura 10. Captura de pantalla del módulo de selección de materiales

Conclusiones

La introducción de un sistema KBE que agrupe diferentes tecnologías propias de sistemas expertos puede demostrar gran utilidad en ambientes de toma de decisiones como lo es la selección de procesos y materiales de fabricación. Este trabajo se ha enfocado al desarrollo de un sistema modular que comprende:

- Modulo 1. Sistema experto apoyado en lógica difusa para gestionar tanto información cuantitativa como cualitativa por parte del usuario, útil para selección y descarte de procesos.
- Modulo 2. Redes neuronales Artificiales y modelos paramétricos para estimación de costes con información abreviada de producto.
- Modulo 3. Bases de datos relacionales y sistema experto, para gestionar criterios de selección de material

Este sistema se ha creado en su versión piloto para probar la eficiencia de estas herramientas en una solución KBE integrada. Se espera a partir de este desarrollo, la ampliación de bases de datos y el crecimiento del modelo para incluir una mayor cantidad de procesos y materiales y convertirse en una aplicación de uso difundido.

Referencias

- ASERM (2006). "Spanish Rapid Manufacturing Association."
- Ashby, M. (2005). Materials Selection in Mechanical Design. Oxford, Elsevier.
- Bernard, A. (2003). "An original approach for the memorisation and the generation of rapid product development processes." Rapid Prototyping Journal 9(2): 58-67.
- Bibb, R., Z. Taha, et al. (1999). "Development of a rapid prototyping design advice system." Journal of Intelligent Manufacturing 10(3-4): 331-339.
- Boothroyd, G., P. Dewhurst, et al. (1994). Product design for manufacture and assembly. New York, Marcel Dekker.

- Campbell, R. I. and M. R. N. Bernie (1996). "Creating a database of rapid prototyping system capabilities." *Journal of Materials Processing Technology* 61(1-2): 163-167.
- CASTLE-ISLAND, C. (2007). "Worldwide Guide to Rapid Prototyping."
- Dewhurst, B. (2007). "Design for Manufacturing and Assembly. Cost reduction Tools." from <http://www.dfma.com/index.html>.
- Giachetti, R. E. (1998). "A decision support system for material and manufacturing process selection." *Journal Of Intelligent Manufacturing* 9(3): 265-276.
- GRANTA, m. i. (2007) "CES EduPack." Volume, DOI:
- Hornberger, L. E. (1993). *Rapid Prototyping Program*. Santa Clara, California, Santa Clara University.
- Kruf, W. (2008). *Implementation and dissemination of RM in the industry. Additive Layered Manufacturing From Evolution to Revolution*. U. o. Maribor. Maribor, Slovenia.
- Lan, H., Y. Ding, et al. (2005). "Decision support system for rapid prototyping process selection through integration of fuzzy synthetic evaluation and an expert system." *I.J. P. R.* 43(1): 169-194.
- Masood, S. H. and A. Soo (2002). "A rule based expert system for rapid prototyping system selection." *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* 18: 267.
- Müller, H. and A. Schimmel (1999). *The Decision Dilemma Assessment and Selection of Rapid Prototyping Process Chains*. Proceedings of the 8th European Conference on Rapid Prototyping and Manufacturing., Nottingham U.K.
- Munguía, J. (2007). *Pursuing successful Rapid Manufacturing in a standards-less industry: a best practice approach*. Virtual and Rapid Manufacturing. J. B. Bartolo, Taylor & Francis: 845.
- Ruffo, M., C. Tuck, et al. (2006). "Empirical laser sintering time estimator for Duraform PA." *International Journal of Production Research* 44(23): 5131-5146.
- Wilson, J. O. (2006). *SELECTION FOR RAPID MANUFACTURING UNDER EPISTEMIC UNCERTAINTY*. Mechanical Engineering, Georgia Institute of Technology. MSc: 156.
- Wohlers, T. T. (2006). *Wohlers report 2006: rapid prototyping & manufacturing state of the industry annual worldwide progress report / Terry T. Wohlers*. Colorado: Wohlers: 272

Agradecimientos

"La investigación descrita en este artículo es un resultado del proyecto MAQMA: DISEÑO Y VALIDACIÓN EXPERIMENTAL DE MECANISMOS DE ALTA COMPLEJIDAD GEOMÉTRICA FABRICADOS DE FORMA ADITIVA POR TECNOLOGÍAS DE FABRICACIÓN RÁPIDA: CIT-030000-2005-35 Dentro del Plan Nacional de I+D+I 2008 –2011



Correspondencia

Javier Munguía
Fundació Privada Centre CIM
C/ Llorens i Artigas, 12. 08028 Barcelona
Tel: +34 934017171 Fax: + 34 934017170
E-mail : jmunguia@cim.upc.edu
URL : <http://www.fundaciocim.org>