

DISTRIBUCIÓN DE TOLERANCIAS EN CONJUNTOS MECÁNICOS. DE LA FUNCIÓN A LA FABRICACIÓN.

F. Romero; P. Company; M. Contero; J. Serrano y C. Vila

Departamento de Tecnología, Universidad Jaume I
Campus de Penyeta Roja, E-12071 Castellón (Spain)
Tel.: 34 (9) 64-345781, Fax: 34 (9) 64-345646

PALABRAS CLAVE:

Ingeniería concurrente. Análisis y distribución de las tolerancias. Modelos de representación basados en "features". Herramientas CASE.

RESUMEN

Se describe un proyecto que se enmarca dentro del campo de la Ingeniería Concurrente (Integración de los procesos de diseño y fabricación) y que tiene por objetivo el establecimiento de procedimientos automáticos de asignación de tolerancias a todas las piezas que constituyen un conjunto mecánico. Asignación de tolerancias que se realizará partiendo de las características funcionales (de ensamblaje, etc.) y del plan de fabricación de las piezas que lo componen.

Aunque en una fase inicial se estudiarán diferentes modelos de representación, se prevé que se trabajará con modelos basados en "Features" (Elementos Característicos), que representen, junto a las características geométricas y de precisión de las piezas que constituyen el conjunto mecánico, las características funcionales que entre estas se establecen. Los modelos de representación deberán contemplar las ligaduras (de ensamblaje, ajuste, contacto, etc.) entre los elementos y superficies de las diferentes piezas, necesarias para el establecimiento de un modelo que permita la asignación de tolerancias. Procedimiento de asignación que conlleva la distribución de los márgenes de variación de las condiciones funcionales del conjunto entre las cotas de fabricación de las piezas que lo constituyen. Distribución que deberá respetar las limitaciones que los procesos y recursos imponen y que deberá atender a criterios económicos.

También se modelizarán, por tanto, los planes de fabricación de las diferentes piezas, los procesos de fabricación (con sus capacidades, costes, etc.) y los recursos utilizados (capacidades, etc).

Un aspecto importante a resolver será el establecimiento de modelos de representación de tolerancias (dimensionales y geométricas) que permitan el establecimiento de metodologías de distribución de tolerancias que posibiliten un tratamiento en tres dimensiones y un tratamiento integrado de las tolerancias dimensionales y de las de forma y posición. El tratamiento del problema con metodología de Features creemos que posibilitará la consecución del objetivo.

Dada la extensión que podría alcanzar el proyecto, si se contemplaran cualquier tipo de elementos característicos y de relaciones, se trabajará con un librería reducida de Features. La finalidad del proyecto es introducir una metodología, no construir una herramienta informática de uso.

1. ANTECEDENTES Y ESTADO ACTUAL.

Las técnicas aplicadas en la actualidad en el campo de la "Tecnología de Tolerancias" [1], [2] van en la línea de la distribución dimensional de las tolerancias en una o dos coordenadas, teniendo en cuenta en el reparto una cierta información del coste relativo a los diferentes procesos de fabricación [3], pero sin tener presentes los planes detallados de fabricación viables en la empresa. Debido a esto, el diseñador asigna unas tolerancias [4], (plano de diseño o funcional) que luego el Ingeniero de fabricación se encarga de transferir a unos plano de fabricación (Preparación del trabajo), que a su vez se corresponden con un plan de proceso determinado. El proceso descrito da lugar a una optimización dudosa y parcial, por cuanto las valoraciones de los procesos de fabricación, realizadas por el Ingeniero de Diseño pueden ser muy diferentes a las del plan de proceso a implementar.

Uno de los enfoques tradicionales dentro del campo del análisis y distribución de tolerancias es el de realizar la validación de un determinado proceso de fabricación para un pieza, con objeto de asegurar que dicho proceso va a permitir obtener las características dimensionales marcadas en el plano de diseño. Además, dicho enfoque propone la obtención de una distribución de tolerancias sobre el plano de fabricación que minimice los costes de producción, optimizando el reparto de las tolerancias de diseño sobre las cotas de fabricación en función de los costes relativos de obtención de las distintas superficies que constituyen la pieza a fabricar. En definitiva, se propone la validación del proceso y la optimización nivel de transferencia de cotas del plano de diseño al de fabricación. [5] [6].

La aparición de medios modernos de producción y control de notables prestaciones (máquinas herramienta de control numérico, máquinas de medición en 3D) ha dejado obsoletos a los métodos seguidos por los ingenieros de diseño para repartir tolerancias entre las distintas piezas que componen un mecanismo. Generalmente este reparto aún se lleva cabo sujetándose a normas existentes de carácter general, aplicándose a condiciones locales entre dos piezas y con un desconocimiento del proceso final defabricación de cada pieza.

Realizando un estudio de las condiciones funcionales de un determinado mecanismo, de las relaciones existentes entre todas las piezas que lo conforman y teniendo en cuenta el proceso de fabricación de cada una de ellas, se puede llevar a cabo una distribución de dispersiones admisibles en las piezas fabricadas de forma que esta sea óptima desde el punto de vista de un coste de obtención mínimo. Esto supone un nuevo enfoque en el que se pretende integrar Concepción y Fabricación. En esta línea van encaminados los trabajos de J. Remy-Vincent y F. Schneider [7] [8], y si bien se limitan al estudio de problemas unidireccionales, han abierto una línea de investigación cuya importancia crece si la aplicamos a los casos bi y tridimensionales, para lo cual el empleo de

Elementos Característicos o "Features" [Conjunto de entidades geométricas (superficies, aristas y vértices) junto con especificaciones de relaciones de ligadura entre ellas mismas y con otros elementos característicos, las cuales implican una función ingenieril sobre un objeto] parece ser el camino a seguir.

Por otra parte, ciertos investigadores están proponiendo un análisis de tolerancias de tolerancias basados en Features pero desde un punto de vista tardicional: basándose en las normas y recomendaciones sobre asignación de tolerancias pretenden automatizar el proceso empleando programas que tienen como entrada el tipo de pieza y su función y tras leer valores de una base de datos asignan las tolerancias. Para ello proponen los sistemas CATAP (Procedimientos de Asignación de Tolerancias Ayudados por ordenador) [9].

También se están investigando nuevas formas de representar las tolerancias para análisis/diseño/fabricación en estos modelos basados en Features [10] [11]. Muchos de estos esfuerzos están teniendo reflejo en el desarrollo de la norma ISO 10303, conocida como estándar PDES/STEP. Esta norma intenta definir una representación de los datos de un producto adaptado al uso del ordenador. esta representación no es ambigua y es independiente de cualquier sistema informático [12] [13].

Una nueva línea de investigación relacionada con el producto es aquella que trata de buscar nuevas formas de modelar el producto y de establecer las relaciones de ligadura (funcionales, de fabricación-montaje) entre las piezas que constituyen el producto o conjunto mecánico, estableciendo además procedimientos de distribución de incertidumbres que integren los requerimientos funcionales y de fabricación. Para ello, el empleo de herramientas CASE (Generación de Software Asistida por Ordenador) como CAS.CADE de Matra Datavisión, de bases de datos dirigidas al objeto como Objetivity y herramientas de Sistemas Expertos basados en el conocimiento como NEXPERT Object,

2. OBJETIVOS DEL PROYECTO.

2.1 Objetivo general

En aras a esclarecer el porqué de las tolerancias (muchas veces no entendido incluso por quienes utilizan métodos de tratamiento de las mismas), cabe decir que las tolerancias dimensionales y geométricas tienen sólo sentido en el ámbito de la fabricación. Es conocido que no se pueden obtener piezas con una dimensión o geometría exacta y que es necesario por tanto un margen de variación para estas magnitudes. En consecuencia, carece de sentido asignar tolerancias que no puedan obtenerse con las capacidades de los procesos y equipos de fabricación, con las técnicas y equipos de medida y con los procedimientos de regulación y control establecidos. Es necesario por consiguiente mantener una consistencia entre tolerancias/capacidades/costes de fabricación.

La asignación de un margen de variación a los valores objetivo de las condiciones funcionales (relacionadas con la geometría) viene impuesta únicamente por el hecho de que las piezas han de ser fabricadas. La selección de unos procedimientos y medios de fabricación no sólo tiene por tanto una relación directa con el coste de producción del

producto, sino que también afecta a la fiabilidad, seguridad, etc., factores que a su vez repercutirán sobre su precio final.

El proceso actual de desarrollo del producto se realiza esencialmente de forma secuencial, con bucles de realimentación, cuyas actividades reproducen la estructura de la empresa. En la Figura 1 se reproduce un esquema usual de un proceso de diseño tradicional [7]. En él se observa que el único vínculo que relaciona la Ingeniería de Diseño y la Ingeniería de Fabricación es el plano de diseño. Tanto es así que estos planos sirven de contrato y son la única referencia en el caso de conflicto entre la Ingeniería de Diseño y Fabricación.

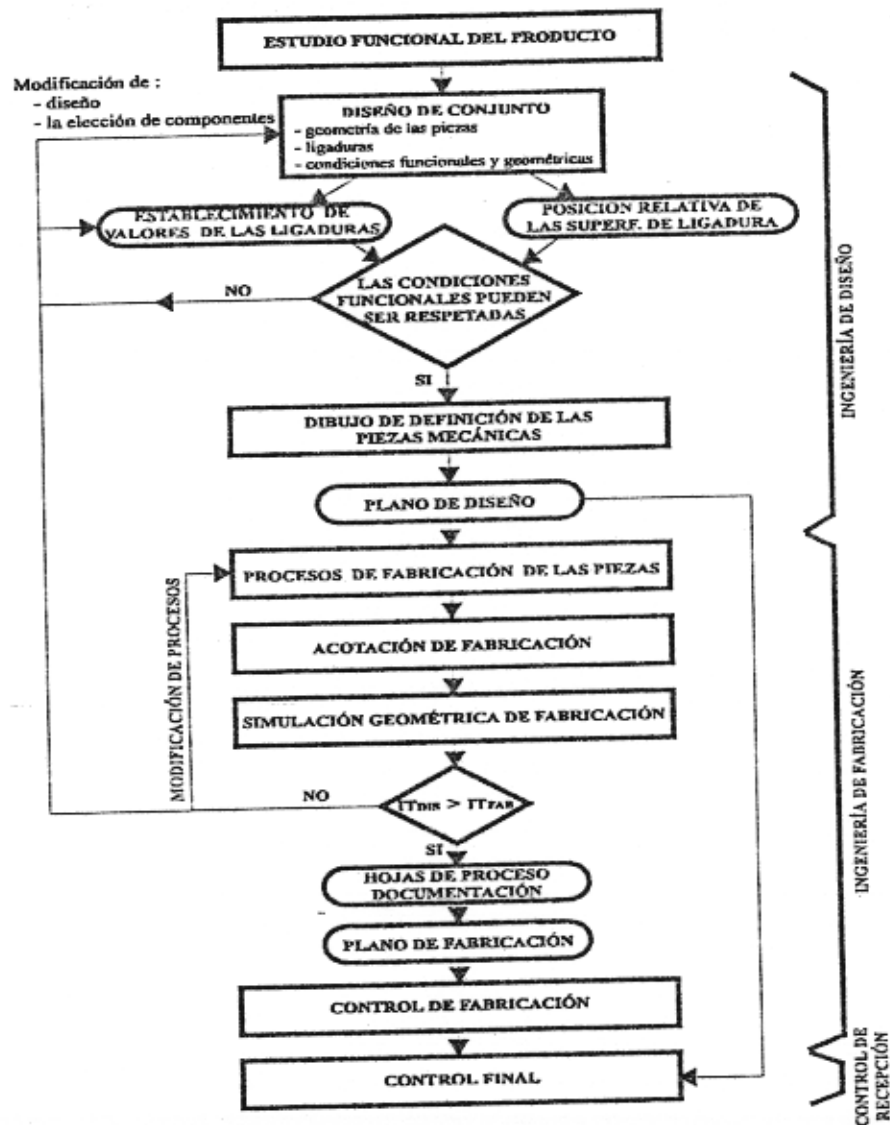


Figura 1. Secuencia de diseño tradicional

Según este esquema la acotación realizada por Ingeniería de Diseño se lleva a cabo básicamente distribuyendo la condición funcional (juegos, aprietes, etc.) entre las dimensiones de las diferentes piezas que definen la cadena de cotas funcional [14], de ahí

que este plano se conozca como plano de diseño o plano funcional. Para ello, el Ingeniero de Diseño debe valorar la dificultad de obtención de las diferentes dimensiones, tarea que realiza habitualmente basándose en valores comúnmente admitidos o que le dicta su experiencia.

Este proceder plantea una serie de problemas:

- Las realimentaciones, sobre todo entre departamentos diferentes, encuentran muchas dificultades que hacen que en la práctica el proceso se realice en un único sentido: *diseño* → *fabricación*.
- Acotados de diseño sobrerrestringidos.
- Inconsistencias en el acotado de diseño.
- Una doble distribución de tolerancias que da lugar a un proceso no optimizado, que genera unas tolerancias de fabricación excesivamente estrechas, máxime cuando la primera distribución la realiza personal que normalmente desconoce los procesos, sus capacidades y la disponibilidad de los mismos.
- La secuencia del proceso está invertida. Como ya se ha indicado, son las capacidades de fabricación las que determinan las tolerancias de fabricación y éstas quienes condicionan la necesidad de las de diseño y no a la inversa según el proceder tradicional aquí expuesto.

Estos problemas, que podemos atribuir a la barrera que se ha creado entre Ingeniería de Diseño, Ingeniería de Fabricación e Ingeniería de Análisis y que se reproduce también en otros aspectos del diseño que no hacen referencia a las tolerancias, ha marcado el nacimiento de un nuevo enfoque en el desarrollo de productos: la *Ingeniería Concurrente*, donde todos los departamentos de la empresa involucrados en el mismo desarrollan sus tareas simultáneamente, cooperando y compartiendo la información desde el inicio del trabajo.

Este nuevo enfoque obliga a plantear en el campo de las tolerancias métodos de optimización concurrente, que integren: los requerimientos funcionales de los conjuntos mecánicos y sus componentes; los requisitos de los planes de fabricación posibles y las capacidades de los procesos, medios de fabricación y control utilizados. En esta dirección de trabajo se enmarca el estudio propuesto, donde se pretende desarrollar un modelo que integra la función y la fabricación y que tiene en cuenta aspectos de coste.

Si el reparto de la variabilidad de una condición funcional se hace tras determinar los procesos de fabricación y simultáneamente sobre el conjunto de cotas fabricadas, entonces conseguiremos dejar la máxima libertad al fabricante de modo que pueda obtener una producción óptima dando máxima la variabilidad a aquellas cotas de fabricación más costosas. Con este fin, se propone un nuevo proceso de desarrollo del producto en el que se trata de optimizar la producción y cuyo esquema se muestra en la Figura 2. Este planteamiento que se ha abordado para una única dirección y considerando solo las tolerancias dimensionales, pretendemos implementarlo en modelos tridimensionales.

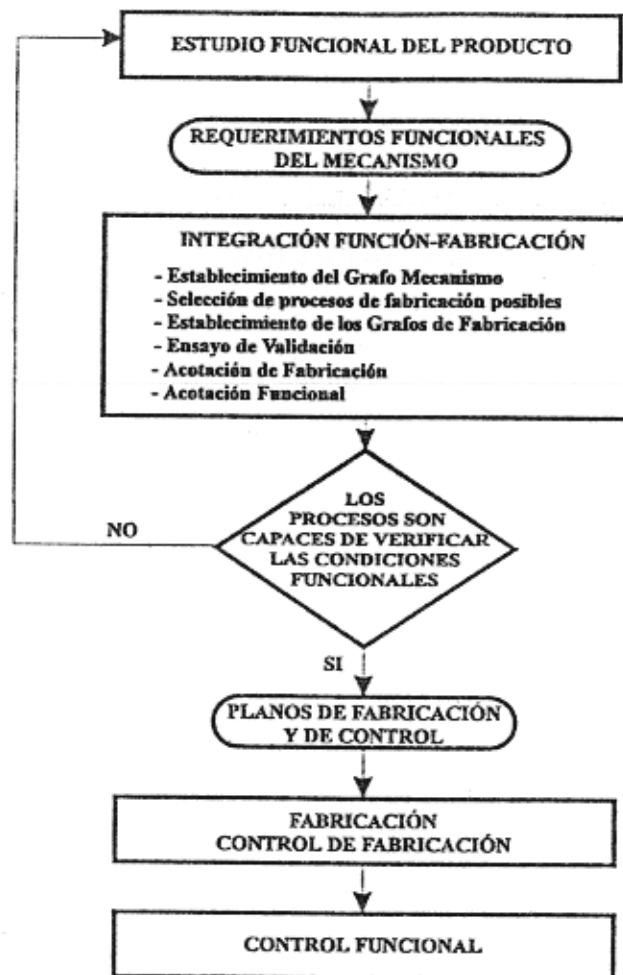


Figura 2. Secuencia de diseño integrado.

El trabajo propuesto, que se centra en el establecimiento de un método de distribución de tolerancias de fabricación según un *modelo integrado Función-Fabricación* orientado a la optimización de los costes de fabricación [8], se fundamenta en las bases teóricas propuestas por Remy-Vincent y Schneider [7] y en el desarrollo de métodos específicos para una sola dimensión llevados a cabo por alguno de los miembros del equipo [15] [16].

A nuestro entender el desarrollo de modelos basados en Features es el instrumento que va a permitir una verdadera integración entre el diseño, la fabricación y la inspección geométrica, y la posibilidad de llevar los estudios de las tolerancias a las tres dimensiones. En este sentido hay que reseñar, que se tendrán en cuenta todos aquellos aspectos que están siendo abordados por los diferentes grupos de trabajo involucrados en el desarrollo de las normas ISO 10303 PDES STEP, tanto en los recursos genéricos y de aplicación (modelo de geometría, modelo de tolerancias, modelo de features de forma, etc.) como en los protocolos específicos (planificación de procesos, ensamblaje, etc.).

2.2 Objetivos específicos

Toda vez que el objetivo global ya se ha explicitado, veamos cuales son los objetivos específicos:

1. Estudiar y determinar un modelo de representación de la concepción/función de un conjunto o ensamblaje mecánico, que modelice las Formas Geométricas, las Condiciones Funcionales y las Relaciones entre Piezas (apriete, contacto, etc.).
2. Investigar nuevas formas de representar las tolerancias de las piezas, tanto dimensionales como geométricas. Representación que deberá integrarse en el modelo general de representación de la geometría de las piezas (modelo geométrico basado en features de forma, geometría en B-Rep, etc.). Modelos, que como ya hemos indicado, deben permitir una metodología de distribución que integre las tolerancias dimensionales y geométricas y que permita un tratamiento en tres dimensiones. Representación que deberá tener una relación con la normalizada ISO, ANSI, etc., que deberá también estudiarse.
3. Analizar las relaciones entre la variabilidad dimensional y geométrica de los elementos de forma afectados por una ligadura y la condición funcional de esa ligadura. Sólo para determinadas ligaduras habituales en los conjuntos mecánicos (ajuste agujero eje, contactos planos, etc.).
4. Modelización de todos los aspectos relativos a la fabricación que intervienen en el proceso de distribución: planes de fabricación, procesos con sus capacidades y costes, capacidades de los recursos (máquinas, útiles, etc.) y otros.
5. Estudio de los procedimientos de distribución de las condiciones funcionales sobre el acotado de fabricación. Este objetivo aglutina las fases de: 1) Distribución de las condiciones funcionales sobre la acotación de diseño; 2) Paso del acotado de diseño al acotado de fabricación; 3) Validación geométrica de los planes de fabricación.
6. Desarrollo, implementación y prueba de programas prototipo, basados en los modelos y métodos seleccionados.

3. CONCLUSIONES.

Debe destacarse que el método que nos proponemos estudiar modifica sustancialmente al método de diseño tradicional, estableciendo en lo referente a la acotación nominal y de tolerancias nuevos procedimientos acordes con las nuevas tendencias de la Ingeniería Concurrente. Su influencia técnico-económica en los futuros sistemas integrados CAD/CAM puede ser decisiva.

La competitividad de las empresas pasa por la reducción del ciclo de desarrollo del producto, que supone una mejora en los beneficios, motivada por una anticipación en la salida al mercado. La tecnología propuesta incide en este aspecto, pero además proporciona una disminución de costes, al proporcionar unas tolerancias al producto fabricado más amplias y al asegurar la consistencia de todo el proceso de asignación de tolerancias, y una mejora en la calidad de los fabricados.

Como ya se ha indicado, el proyecto no pretende el desarrollo de un software comercial, adaptado a un tipo de producto y proceso (aunque las pruebas se ralicen para un determinado tipo de proceso: mecanizado). Los resultados serán por tanto de aplicación para el proceso de diseño-fabricación de cualquier tipo de producto de funcionalidad

mecánica, que requieren de unas condiciones funcionales: de montaje, de uso, etc. Los sectores de construcción de máquinas-herramienta, moldes, utillajes, muebles, etc. son susceptibles de beneficiarse de los desarrollos que en esta línea se produzcan.

4. Referencias.

1. Kumar, S. and Raman, S. "Computer-Aided Tolerancing: the past, the present and future". *Journal of Design and Manufacturing*, 2, 1992, pp. 29-41.
2. Zhang, H.C. and Huq, M.E. "Tolerancing Techniques: the state-of-the-art". *International Journal of Production Research*, Vol. 30, No. 9, 1992, pp. 2111-2135.
3. Chase K.W. et al. "Least Cost Tolerance Allocation for Mechanical Assemblies with Automated Process Selection". *Manufacturing Review*, Vol. 3, No. 1, 1990, pp. 49-59.
4. BjØrke, Ø. *Computer-Aided Tolerancing*. ASME Press, 1989.
5. Bourdet, P. *Cotation de Fabrication*. Cours E.N.S. Cachan, 1976.
6. Seguí, J.; Romero, F. y Zamanillo, J.D.. "Bases para la asignación de tolerancias en sistemas CAD/CAM. Validación geométrica de planes de fabricación". *Anales de Ingeniería Mecánica*, Año 10, vol. 2, 1.992.
7. Remmy-Vincent, J. et Schneider F. *De la Fonction à la Fabrication*. DEA de Production Automatisée, Université de Nancy 1, 1990.
8. Serrano, J. *De la Función a la Fabricación: Aplicación práctica para una Modelización Unidireccional*. PFC ETSII UPV, 1993.
9. Clement, A.; Riviere, A. et Temmerman, M. *Cotation tridimensionnelle de systemes mecaniques*. Pyc Edition, 1993.
10. Panchal, K.; Raman, S. and Pulat, S. "Computer-aided tolerance assignment procedure (CATAP) for design dimensioning". *International Journal of Production Research*, Vol. 30, No. 3, 1992, pp. 599-610.
11. Charles, B.; Clement A. et al. "Controlling a Mechanical Part Designed with a Feature Based System", *Computer Integrated Quality System in CIM Systems*, Edit. V. R. Milacic, Elsevier Science Publishers, 1990.
12. Romero, F.; Rosado, P.; "The design of a line control system for the modular furniture industry". *International Journal of Production Research*, July 1995.
13. Contero, M.; "Consideraciones en torno a la norma ISO 10303 (STEP) y su efecto en la arquitectura de los sistemas de diseño asistido por ordenador". *Actas del VIII Congreso internacional de expresión gráfica en la ingeniería*. Tomo I, 1996, pp. 485-498.
14. Ropion, R. *La cotation fonctionnelle des dessins techniques*. Ed. Dunod. Paris, 2ª ed. 1971.
15. Serrano, J.; Romero, F.; Seguí, J.; Zamanillo, J.D.; "Obtención de una acotación de fabricación óptima a partir de las condiciones funcionales. Caso unidireccional", *Anales de Ingeniería Mecánica*, Año 10, vol. 2, 1.994, pp. 83-91
16. Romero, F.; Vila, C.; Contero, M.; "Diseño de un producto en un ámbito de ingeniería concurrente utilizando herramientas STEP". *Actas del II Congreso Internacional de Ingeniería de Proyectos*, 1995, pp. 524-531.



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI NAPOLI FEDERICO II
DIPARTIMENTO DI PROGETTAZIONE E GESTIONE INDUSTRIALE
DIPARTIMENTO DI PROGETTAZIONE AERONAUTICA



ADM ASSOCIAZIONE NAZIONALE
DISEGNO DI MACCHINE



*Embajada de España
Consejería de Educación
Italia*



**ATTI
DEL**

Seminario Italo-Español

**DISEGNO DI MACCHINE E
PROGETTAZIONE INDUSTRIALE**

**DIBUJO DE MÁQUINAS Y
DISEÑO INDUSTRIAL**

Facoltà di Ingegneria - Napoli
25 - 27 giugno 1996

ASSOCIAZIONE NAZIONALE DISEGNO DI MACCHINE

ATTI DEL SEMINARIO ITALO-ESPAÑOL

DISEGNO DI MACCHINE E PROGETTAZIONE INDUSTRIALE
DIBUJO DE MÁQUINAS Y DISEÑO INDUSTRIAL

NAPOLI 25, 26, 27 GIUGNO 1996

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI NAPOLI FEDERICO II

FACOLTÀ DI INGEGNERIA

Codice ISBN 88-900081-1-3

a cura di Antonio Lanzotti

Gli Atti del Convegno sono pubblicati con il contributo finanziario del Comitato Organizzatore del IX Convegno ADM, del Dipartimento di Progettazione e Gestione Industriale e del Dipartimento di Progettazione Aeronautica.

*Finito di stampare nel mese di novembre 1996
nelle officine grafiche napoletane Francesco Giannini & Figli.*