

**UNIVERSIDAD DE HOLGUÍN**  
**“OSCAR LUCERO MOYA”**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**  
**CENTRO DE ESTUDIOS CAD/CAM**



## **INTEGRACIÓN DE LA SÍNTESIS DE TOLERANCIAS EN LOS SISTEMAS CAPP**

Tesis presentada en opción del título de Máster en CAD/CAM

**YOANDRYS MORALES TAMAYO**

**Holguín 2011**

**UNIVERSIDAD DE HOLGUÍN**  
**“OSCAR LUCERO MOYA”**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**  
**CENTRO DE ESTUDIOS CAD/CAM**



## **INTEGRACIÓN DE LA SÍNTESIS DE TOLERANCIAS EN LOS SISTEMAS CAPP**

Tesis presentada en opción del título de Máster en CAD/CAM

Autor: Ing. YOANDRYS MORALES TAMAYO  
Tutores: Dr. C. ROBERTO PÉREZ RODRÍGUEZ  
Dr. C. RICARDO ÁVILA RONDÓN

**Holguín 2011**

## **AGRADECIMIENTOS**

A mis padres, por haberme guiado con su sabiduría en la vida y haberme apoyado en todo momento.

A los directores de la tesis Roberto Pérez Rodríguez y Ricardo Ávila Rondón, por su enseñanza y gran ayuda.

A Arlys Michel Lastre Aleaga por su apoyo incondicional, ejemplo y sincera amistad.

A los profesores del Centro de Estudios CAD/CAM, por las enseñanzas y apoyo en la realización de la Maestría y en especial a Raúl Santana Milán por su ayuda y comprensión.

A los trabajadores del hotelito de Post-Grado, por las atenciones brindadas y en especial a Juan Carlos Zaldívar.

A todos los que de una forma u otra me han apoyado en el desarrollo de la tesis.

## **DEDICATORIA**

A mis padres.

## **RESUMEN**

En el proceso de diseño mecánico, las tolerancias constituyen un aspecto crítico, debido a que las decisiones relacionadas con las tolerancias pueden influir de forma decisiva en la calidad y los costos del producto. El proceso de síntesis de tolerancias constituye una de las tareas más complejas debido a su carácter heurístico. La presente investigación aborda un modelo conceptual para la síntesis de tolerancias orientado a los procesos de planificación asistida por computadora (CAPP), donde se logra un adecuado tratamiento de los requerimientos funcionales y las tolerancias en la etapa de especificación, de forma tal que se garantice la síntesis de tolerancias en la etapa de diseño básico y de detalle. Se ajustan las tolerancias dimensionales para la determinación del proceso de fabricación, el método de elaboración, así como en la elección de la máquina-herramienta y en las herramientas de corte. Se aplica el método desarrollado a un caso de estudio, para validar la propuesta, obteniéndose la ruta tecnológica de la pieza de mayor importancia funcional.

**Palabras clave:** Síntesis, Diseño conceptual, Tolerancias, Ensamblajes, CAPP.

## **ABSTRACT**

In the mechanical design process, the tolerances constitute a critical aspect, because the decisions related with the tolerances can influence in a decisive way in the quality and the costs of the product. The process of synthesis of tolerances constitutes one of the most complex tasks due to its heuristic character. In this article a conceptual model is approached for the synthesis of tolerances guided to the computer aide processes planning (CAPP), it is achieved an appropriate treatment of the functional requirements and the tolerances in the specification stage, in such way that the synthesis of tolerances is guaranteed in the stage of basic design and of detail. The dimensional tolerances are adjusted for the determination of the process of production, the elaboration method, also in the election of the machine-tool and in the court tools. The developed method is applied to a case of study to validate the realized proposal, obtained the technological route of the piece of functional bigger importance.

**Key words:** Synthesis, Conceptual design, Tolerances, Assemblies, CAPP.

## TABLA DE CONTENIDO

<b>INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>1</b>
<b>1 ANTECEDENTES DE LA SÍNTESIS DE TOLERANCIAS Y LOS SISTEMAS CAPP .....</b>	<b>4</b>
1.1 Antecedentes de las dimensiones y tolerancias asistidas por ordenador .....	4
1.1.1 Análisis de dimensiones y tolerancias .....	5
1.1.2 Síntesis de dimensiones y tolerancias .....	7
1.2. Antecedentes de los sistemas CAPP .....	11
1.2.1 Integración del diseño, la planificación y la manufactura asistida por computadoras.....	11
1.2.2. Planificación de los procesos de manufacturas.....	11
1.2.3. Estudios relacionados con el tema .....	15
1.3 Conclusiones.....	18
<b>2 MÉTODO DE INTEGRACIÓN DE LA SÍNTESIS DE TOLERANCIAS EN LOS SISTEMAS CAPP .....</b>	<b>19</b>
2.1 Integración del diseño y la planificación del proceso en el maquinado .....	19
2.2 Método de integración de la síntesis de tolerancias en los sistemas CAPP....	20
2.2.1 Identificación y caracterización de los requerimientos funcionales y las tolerancias.....	21
2.2.2 Cálculo y corrección de las tolerancias dimensionales .....	29
2.2.3 Selección de las piezas a fabricar .....	30
2.2.4 Determinación de los procesos de mecanizado y métodos de elaboración .	32
2.2.5 Determinación del tipo de colocación .....	32
2.2.6 Determinación de la secuencia de mecanizado .....	34
2.2.7 Selección de las máquinas-herramienta.....	35

2.2.8 Selección de las herramientas de corte y de los parámetros de corte .....	37
2.3 Concepción de un sistema CAD/CAPP para la generación de variantes tecnológicas .....	41
2.4 Conclusiones.....	42
3 CASO DE ESTUDIO .....	43
3.1 Introducción.....	43
3.2 Identificación y caracterización de los requerimientos funcionales y las tolerancias.....	43
3.3 Modelación del ensamble (formación y evaluación de las cadenas dimensional) en el diseño conceptual.....	45
3.4 Cálculo y corrección de las tolerancias dimensionales (Síntesis de tolerancias) .....	50
3.5 Selección de las piezas a fabricar .....	52
3.6 Determinación de los procesos de mecanizado y métodos de elaboración ....	53
3.7 Determinación del tipo de colocación.....	57
3.8 Elección de la herramienta de corte y los regímenes de corte .....	58
3.9 Conclusiones.....	63
Conclusiones generales .....	64
Recomendaciones.....	65
Referencias bibliográficas .....	66



## **INTRODUCCIÓN**

En el proceso de diseño mecánico las tolerancias constituyen un aspecto crítico, debido a que las decisiones relacionadas con las tolerancias pueden influir de forma decisiva en la calidad y los costos del producto. La utilización de tolerancias muy amplias puede provocar dificultades en el proceso de diseño, mientras que el empleo de tolerancias muy estrechas puede incrementar el tiempo de fabricación y los problemas en el proceso de montaje o ensamblajes [Pérez, R., 2004]. Por tanto, existe la necesidad de aplicar en el proceso de diseño de los productos, herramientas que permitan evaluar y cuantificar las tolerancias a fabricar.

El análisis y el control de las tolerancias se han convertido en un foco de atención en las empresas de fabricación con el objetivo de incrementar la productividad y mejorar la calidad de los productos. Los efectos de las tolerancias son bien conocidos, por una parte influyen en el proceso de ensamble, y por otra, en los costos de producción, la selección de los procesos, las herramientas, los costos de ajustes, la selección de los procesos de inspección, etc. Además, las tolerancias influyen directamente en el desempeño y la robustez del diseño [CHASE, K.W., 1995].

La especificación de tolerancias constituye un vínculo importante entre el diseño y la fabricación, además de servir como plataforma para definir las interfaces necesarias. Sin embargo, los diseñadores a menudo asignan las tolerancias de manera arbitraria o basan sus decisiones con datos insuficientes. Cualquier error en el proceso de especificación, deberá entonces corregirse en el proceso de fabricación y control [CHASE, K.W., 1988].

La tendencia actual debido al desarrollo de la informática, los avances en la mecatrónica, la robótica, el surgimiento de nuevos materiales y las nuevas tecnologías de fabricación, han revolucionado la capacidad generativa de las industrias, llevando a la aparición de sistemas asistidos como el diseño (CAD), la manufactura (CAM) y el proceso de planificación asistido por computadoras (CAPP) garantizando un mayor nivel de integración de la gestión.

Los software del tipo CAPP, son sistemas informáticos que asisten a la labor del ingeniero de la producción en la determinación de las rutas de fabricación de un determinado producto y de la disponibilidad de los centros de trabajo de la empresa.

A pesar de las garantías que brindan las aplicaciones CAPP, estos y otros sistemas estudiados poseen limitaciones, los más actuales son muy especializados para las soluciones de problemas en determinadas industrias. En este sentido, ante la diversidad de máquinas-herramienta existentes en la industria cubana con fuerte componente en las máquinas convencionales y poca implementación en las tecnologías CNC surge la **necesidad** de desarrollar un método que se utilice para desarrollar la integración de la síntesis conceptual de tolerancias con un sistema de planificación asistida por computadora para el maquinado.

**Problema científico:** La no existencia de un método que integre las síntesis conceptual de tolerancias en el Proceso de Planificación Asistida por Computadoras.

**Hipótesis:** Si se desarrolla un método que integre la síntesis conceptual de tolerancias en el Proceso de Planificación Asistido por Computadoras, entonces, se obtendrán tecnologías cualitativamente mejores.

**Objeto:** Proceso de diseño y fabricación.

**Campo:** La síntesis de tolerancias para el ensamble de productos en las etapas del diseño conceptual y los sistemas de planificación asistidos por computadora.

**Objetivo General:** Desarrollar un método para integrar la síntesis conceptual de tolerancias con el Proceso de Planificación Asistido por Computadoras en el proceso de mecanizado.

**Objetivos específicos:**

- ✓ Revisar el desarrollo de las investigaciones relacionadas con las tolerancias y los procesos de planificación asistidos por computadora.
- ✓ Revisar el desarrollo de las técnicas y algoritmos utilizados para la

generación de rutas tecnológicas.

- ✓ Desarrollar las técnicas que se utilizan en la síntesis de tolerancias.
- ✓ Desarrollar los fundamentos científico-técnicos de un método para la integración de la síntesis de tolerancias en el proceso de planificación asistido por computadoras para el mecanizado.

**Novedad Científica:** Un método que permite la integración de la síntesis de tolerancias en el Proceso de Planificación Asistido por Computadoras.

### **Métodos de investigación**

Con el objetivo de arribar al propósito final de este trabajo se utilizaron diferentes métodos de la investigación científica tales como:

- La investigación bibliográfica o análisis documental, para fundamentar el problema y la obtención de la información más actualizada posible sobre el tema.
- El procesamiento y análisis de la información, con el objetivo de seleccionar y transformar según sea necesario aquella información relevante acorde con los objetivos del trabajo a desarrollar, lo que implica la aplicación del método histórico lógico para determinar las tendencias actuales de desarrollo de esta actividad.
- El análisis-síntesis para la obtención de un nuevo conocimiento contextualizado, como resultado del análisis de las teorías existentes hasta el momento.
- La inducción-deducción, para hacer referencias oportunas de lo particular a lo general y viceversa, según las circunstancias específicas de cada una de las etapas de trabajo lo requieran.
- La síntesis de tolerancias y la planificación de la producción como métodos específicos del objeto de investigación.

## **1 ANTECEDENTES DE LA SÍNTESIS DE TOLERANCIAS Y LOS SISTEMAS CAPP**

En el presente Capítulo se describe las tendencias existentes respecto a la síntesis de tolerancias en el diseño de productos y los sistemas de planificación asistida por computadoras. En cada una de las temáticas de investigación se resaltan los autores más representativos y los aspectos más relevantes.

### **1.1 Antecedentes de las dimensiones y tolerancias asistidas por ordenador**

El aumento de la competencia en el área de la fabricación moderna ha dado lugar a una mayor preocupación por la reducción de los costes en la fabricación, por el aumento de la calidad del producto y por la reducción del tiempo entre el desarrollo del concepto y la producción. Estos requerimientos, junto a la complejidad creciente de los requerimientos funcionales y los sistemas productivos, han contribuido a que exista un interés creciente en el estudio de las dimensiones y tolerancias.

El dimensionamiento que se utiliza en el proceso de diseño permite definir los límites funcionales de la geometría de las piezas, incluyendo la descripción de las relaciones funcionales esenciales. Históricamente, estas relaciones se han expresado a través de símbolos normalizados. El método de acotado se ha basado en la representación gráfica y necesita de la intervención humana para su cálculo, representación e interpretación. Este método depende considerablemente de la experiencia del diseñador y de reglas heurísticas que pueden variar y ser fuentes de errores. Los avances en el área del diseño asistida por computadora (CAD) y la manufactura asistida por computadora (CAM) han propiciado un incremento en los esfuerzos por automatizar los procedimientos relacionados con las dimensiones y tolerancias [Pérez, R.; Ciurana, J.; Riba, C., *et al.*, 2000].

A continuación se exponen los trabajos de investigación más relevantes diferenciados por la línea de investigación a que pertenecen. Los trabajos se enmarcan dentro de dos de las tres líneas fundamentales de investigación, destacando a los autores más representativos.

### **1.1.1 Análisis de dimensiones y tolerancias**

El análisis de dimensiones y tolerancias consiste en el proceso de estimar la acumulación de las tolerancias de diseño en las dimensiones de los componentes para asegurar que las piezas puedan ser ensambladas, a partir de las tolerancias de las piezas o componentes del ensamble.

Las investigaciones se han encaminado hacia el desarrollo de técnicas estadísticas y determinísticas para la síntesis de tolerancias. En el entorno de la síntesis de dimensiones y tolerancias se incluyen los siguientes trabajos investigativos:

- a) Asignación de tolerancias estadísticas, de autores como Evans [EVANS, D., 1975] y Parkinson [PARKINSON, D.B., 1985]; y el desarrollo de modelos estadísticos para la resolución del problema del análisis de tolerancias de autores como Chase [CHASE, K.W., 1999], Emch [EMCH, G. y A. PARKINSON, 1994], Gao [GAO, J. *et al.*, 1998], Svetko [SVETKO, R. *et al.*, 1998], Donnarumma [DONNARUMMA A. y G. GIORLEO, 2002] y Merkley [MERKLEY, K.G., 1998].
- b) Estudios para la elaboración de las cadenas de cotas, de autores como Wang [WANG, N. y OSZOY, T.M., 1993], Portman [PORTMAN, V., 1995] y Söderberg [SÖDERBERG, R. y H. JOHANNESSON, 1999].
- c) Simulación de mecanismos para la deducción de las tolerancias, de autores como Söderberg [SÖDERBERG, R. y L. LINDKVIST, 2000], Heng *et al.* [HENG, W., *et al.*, 2005] y Johannesson [JOHANNESSON, H. Y R. SÖDERBERG, 2000].
- d) La aplicación de la Inteligencia Artificial y los Sistemas Expertos al análisis de tolerancias, de autores como Baharin [BAHARIN, S. *et al.*, 1993].

A continuación se ofrecen criterios sobre los trabajos de investigación destacados en esta rama.

Una de las formas de asignar las tolerancias es mediante las distribuciones estadísticas y el desarrollo de modelos estadísticos para la resolución del

problema del análisis de tolerancias. Área muy estudiada por diversos autores [SRINIVASAN, S., *et al.* 1996], [EVANS, D., 1975], [NIGAN, S.D. y J. TURNER, 1995], Chase [CHASE, K.W. *et al.*, 1997], Gao [GAO, J. *et al.*, 1998] y Svetko [SVETKO, R. *et al.*, 1998].

Se clasifican en métodos para el análisis de los casos límites —«*worst case*», determinístico o análisis de tolerancias de alto nivel— y métodos para el análisis estadístico. En el primer caso se consideran las peores combinaciones posibles de las tolerancias individuales y se examina el ensamble del 100 por ciento de las piezas. Este análisis induce la selección de tolerancias muy estrechas para las piezas y por tanto, aumentan los costos de producción.

El enfoque estadístico del análisis de tolerancias es mucho más práctico y resulta una vía más económica en la búsqueda de las tolerancias que aseguren el ensamble. En este caso, el diseñador asume la posibilidad de que exista un por ciento de piezas rechazadas.

Gerth y Pfeifer [GERTH, R.J. y T. PFEIFER, 2000] mostraron un método para el análisis de la sensibilidad del costo de la tolerancia que permite determinar cuáles características son o no críticas en las primeras etapas de diseño. Por su parte, Ramos y colaboradores [RAMOS, B., *et al.*, 2002] realizaron un estudio acerca del estado actual de los métodos utilizados en el análisis de las tolerancias en los ensambles, las características que influyen en la posición de una pieza en el conjunto y una descripción breve de algunos de los software existentes para el análisis de tolerancias.

Yujing [YUJING F., 2004] propuso una metodología consistente en un modelo CAD para el cálculo de las tolerancias finales en el proceso de maquinado, asumiendo que la variación del proceso de maquinado es conocida (emplea el método estadístico de la simulación de Monte Carlo). El estudio abarca las tolerancias de posición, planicidad, paralelismo, angularidad, perpendicularidad y circularidad.

Kulderknup *et al.* [KULDERKNUP, E., *et al.*, 2004] introdujeron modificaciones para el cálculo de los límites y las tolerancias de las dimensiones dependientes,

teniendo en cuenta la influencia de las condiciones ambientales como la temperatura de trabajo y la humedad de los elementos simples de la cadena dimensional, considerando las dimensiones de los elementos de la cadena como variables aleatorias con las incertidumbres asociadas.

Heng et al. [HENG, W., *et al.*, 2005] desarrollaron un modelo geométrico CAD para simular las tolerancias y la generación automática de las cadenas dimensionales de piezas y ensambles en 3D. El método permite la generación de las ecuaciones de la cadena dimensional.

YU *et al.* [YU, D., *et al.*, 2005] presentaron una metodología que extiende el alcance de la investigación de tolerancias para incluir las variables del proceso en los esquemas de tolerancias y desarrollar un método de síntesis de tolerancias para el proceso de diseño del ciclo de vida en un sistema de ensamble con diferentes dispositivos; o sea, expande el actual concepto de pieza intercambiable en los procesos. El enfoque integra el diseño y la fabricación y así puede asignar de forma óptima las tolerancias para procesar variables del sistema completo con una significativa reducción del costo de fabricación.

Bouaziz y Masmoudi [BOUAZIZ, Z. y F. MASMOUDI, 2006] desarrollaron un sistema para la creación automática de las dimensiones de trabajo a través del método de tablas de tolerancias, que generan los gráficos de dimensiones, las cadenas dimensionales por una presentación teórica, y por último, el cálculo de los intervalos de tolerancias a partir de la resolución de un sistema de ecuaciones de acuerdo a las mínimas tolerancias impuestas por el proceso de fabricación y al peso asignado a las tolerancias.

### **1.1.2 Síntesis de dimensiones y tolerancias**

La síntesis de dimensiones y tolerancias es la línea de investigación que más complejidad introduce, pues a la complejidad ya descrita en el análisis de cotas, se le adiciona el hecho de que la suma y resta no es de resolución directa [CIURANA, J., 1997]. Los trabajos investigativos desarrollados acerca de la síntesis de dimensiones y tolerancias funcionales pueden enmarcarse en las siguientes líneas:

- a) Métodos para la distribución de tolerancias, tendencia descrita por autores como Willhelm [WILLHELM, R., 1992].
- b) La asignación de tolerancias basada en los procesos productivos, de autores como Bourdet [BOURDET, P., 1982], Anselmetti [ANSELMETTI, M.B., 1995], y Villeneuve [VILLENEUVE, F., 1999].
- c) Síntesis de tolerancias basada en las condiciones funcionales, de autores como Weill [WEILL, R., 1997], [Pérez, R., 2004, 2005, 2006, 2008, 2011] y Ciurana [CIURANA, J., 1997, 2000]. Estudios para la elaboración de las cadenas dimensionales, de autores como Wang [WANG, N., 1993], Portman [PORTMAN, V., 1995] y Söderberg [SÖDERBERG, R., 1999].
- d) Modelos estadísticos para la resolución del problema de la síntesis de dimensiones y tolerancias, de autores como Chase [CHASE, K. W. et al., 1990, 1999], Zhang [ZHANG, C., 1999] y Sudarsan [SUDARSAN, R. ET AL., 2000].
- e) Líneas que coinciden con las del análisis, como la transferencia de cotas y/o los flujos de estudio para el análisis del ensamble, de autores como Serrano [SERRANO, J., 1993, 1994].

Si se realiza un análisis comparativo entre el análisis y la síntesis de dimensiones y tolerancias, se puede concluir que el origen de ambos problemas es semejante. Los dos métodos de manipulación de las tolerancias han de resolver casos a partir de la formación de las cadenas de cotas [CIURANA, J, 1997]. Para poder implementar en los sistemas CAD ambos métodos es necesaria la integración de las tolerancias en las bases de datos de los modeladores de sólidos y la interpretación por parte de los modeladores de sólidos de los contactos entre piezas, con el objetivo de poder determinar las cadenas dimensionales que comportan ambos métodos.

Villeneuve *et al.* [VILLENEUVE, 1999] han desarrollado métodos analíticos donde incorporan a la síntesis de tolerancias el tratamiento de los métodos productivos. Chase *et al.* [CHASE, K.W., 1999] introducen un procedimiento para la especificación de tolerancias basado en estimaciones cuantitativas de los costos de las tolerancias, permitiendo la selección de las tolerancias de los componentes



de los ensambles mecánicos con un costo de producción mínimo. Este procedimiento es aplicable a los actuales sistemas CAD, debido a su naturaleza analítica.

Michael y Siddall [ROY, U., 1991] propusieron para la síntesis de tolerancias una formulación de vectores espaciales. En esta formulación, se define un vector espacial con las coordenadas correspondientes a las dimensiones independientes.

Una de las áreas de estudio más amplias que existen en la síntesis de dimensiones y tolerancias es el grupo de métodos estadísticos encaminados a proponer soluciones, sin embargo, es mucho más reducido que el grupo de métodos estadísticos existentes para el análisis de dimensiones y tolerancias. Entre los autores más representativos de este grupo se encuentra Chase *et al.* [Chase, 1990, 1999], que han desarrollado diversos métodos encaminados a mejorar el tratamiento estadístico de la síntesis de tolerancias, siempre vinculado a los sistemas CAD. Otros autores como Zhang [ZHANG, C., 1999.] han creado modelos para la optimización de la síntesis estadística de tolerancias basados en la especificación de las zonas de tolerancias.

Existe un tipo de estudio enmarcado en la síntesis de dimensiones y tolerancias, que establecen flujos de razonamientos para la asignación de las tolerancias [MARTINO, P., 1992.]. Estos flujos se caracterizan por el hecho de ser capaces de abordar y considerar de forma global aspectos como la fabricación, los costos, la colocación, la entrada de datos externos, etc.

También se han de incluir en esta línea de investigación todos los trabajos que presenten diversas formas de representar las condiciones funcionales [SERRANO, J., 1994; SCHNEIDER, F., 1994; CIURANA, J., 1997, 2000] como, por ejemplo, condiciones de montaje, de posición, de contacto o no contacto, etc., que permiten establecer la cadena de cotas de forma lógica. Este concepto no deja de ser común a las otras dos líneas de investigación, al igual que los trabajos que establecen las bases para establecer patrones para representar las relaciones entre las piezas, que siempre serán una ayuda en la elaboración de la cadena de cotas, aspecto fundamental para la síntesis de dimensiones y tolerancias.

Como se ha descrito anteriormente, uno de los núcleos a tratar para la resolución de la síntesis de dimensiones y tolerancias es la cadena de cotas, y por tanto, la consideración de todos los trabajos que exponen formas de plantear la cadena de cotas [WANG, N., 1995] o ayuden en la elaboración más cómoda a partir de los datos de diseño, datos externos o datos gráficos, se incluirán en esta línea de investigación. Schneider, Söderberg y Johannesson [SÖDERBERG, R., 1999] han desarrollado un método para la detección de las cadenas de tolerancias basado en el análisis de las restricciones geométricas. Este método permite detectar las cadenas de cotas potenciales en las etapas primarias del proceso de diseño.

Pérez *et al.* [Pérez, R., 2004, 2005] desarrolla un modelo orientado a los sistemas CAD, que permita una caracterización y representación de los requerimientos funcionales y las tolerancias en la etapa de especificación del proceso de diseño; y el desarrollo de un método para la modelación del ensamble que posibilitó un análisis primario de las cadenas de cotas en el diseño conceptual.

Pérez *et al.* [Pérez, R., 2006] integran el modelo orientado a los sistemas CAD al modelo del proceso de diseño de Pugh. Al método de las burbujas se le adicionan nuevas reglas para su adecuación a ensambles complejos.

Pérez *et al.* [Pérez, R., 2008] desarrollan un modelo para el análisis concurrente de tolerancias a través del ciclo de vida del producto en un contexto de Ingeniería Colaborativa. Se basan en el modelo VERA (Virtual Enterprise Reference Architecture) de desarrollo de productos.

Pérez *et al.* [Pérez, R., 2011] proponen la evaluación conceptual de la síntesis de tolerancias utilizando también el modelo de referencia VERA, aplicado al diseño conceptual de ensambles mecánicos.

La revisión bibliográfica demuestra la necesidad de realizar estudios e investigaciones relacionadas con la integración de los diferentes enfoques de la síntesis de tolerancias con los sistemas de apoyo a la planificación de la producción asistida por computadoras.

## **1.2. Antecedentes de los sistemas CAPP**

### **1.2.1 Integración del diseño, la planificación y la manufactura asistida por computadoras**

Frecuentemente que se pasa por alto la planificación de procesos como un paso en la integración del diseño asistido por computadora (CAD) y la manufactura asistida por computadora (CAM). Los sistemas CAD son orientados a generar datos gráficos y llegan incluso a identificar el metal que debe ser removido durante la fabricación. A fin de producir instrucciones de control numérico para el equipamiento CAM deben tomarse algunas decisiones básicas como: ¿Qué equipo se debe usar?, ¿Qué herramientas? y ¿Qué secuencia de operaciones? Estas preguntas responden, precisamente, a la función del proceso de planificación asistida por computadoras (CAPP). Sin elementos del CAPP, no podría haber integración CAD/CAM.

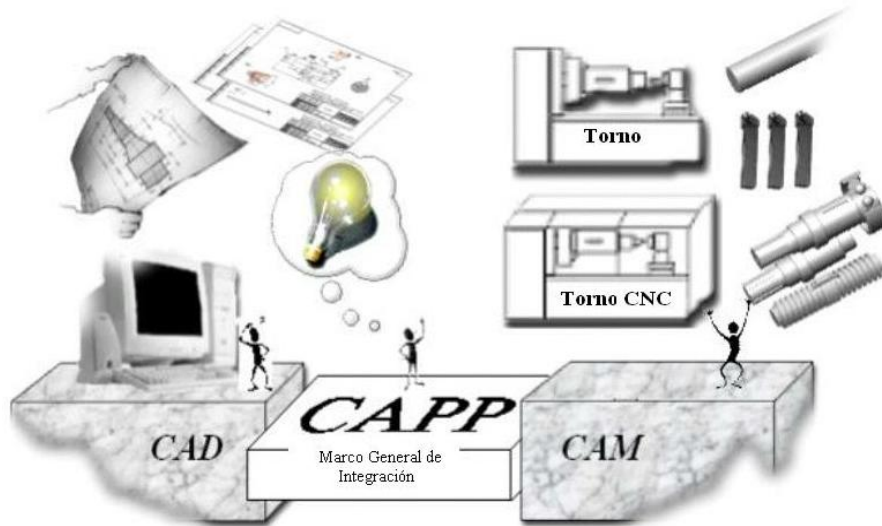
Así como el **CAD** define **Qué** se debe producir y la planificación de la producción (programación o gestión de la producción) define **Cuándo** se debe fabricar, la preparación del trabajo determina **Cómo** se debe fabricar.

Se puede afirmar que la planificación de las operaciones tecnológicas representa el enlace entre la ingeniería de diseño y el taller de manufactura y determina el comportamiento de los indicadores de eficiencia de la fabricación. La brecha entre el CAD y el CAM se puede acortar considerablemente al desarrollar mejores sistemas para la planificación de las operaciones tecnológicas.

Los sistemas CAD proveen datos gráficos a los sistemas CAPP para utilizarse en la realización de dibujos de ensambles. Estos datos gráficos se pueden introducir en la máquina herramienta por medio de soportes magnéticos o por instrucciones escritas [CROW, K., 2000.]

### **1.2.2. Planificación de los procesos de manufacturas**

Los sistemas CAPP solucionaron la separación (abismo) que existía entre el CAD y el CAM (Figura 1.1).



**Figura 1.1.** Integración CAD/CAPP/CAM [FALCÓ S., 2004].

Diversos autores definen el concepto de planificación de procesos asistido por computadoras (CAPP): Chang, Wysk, & Wang [CHANG, T., WYSK, R., WANG, H., 1998] plantean que la planificación de procesos es la función dentro de la manufactura que establece qué procesos y parámetros deben usarse (así como las máquinas que son capaces de realizar estos procesos) para convertir una pieza desde su forma inicial hasta su forma final que ha sido predeterminada usualmente por un diseñador mecánico.

A tenor de lo antes planteado cabe preguntarse: ¿Qué es el CAPP? Según Leondes [LEONDES, C., 2001] la planificación de procesos asistida por computadoras es la determinación sistemática de métodos de manufactura y detalles de operaciones por el cual pueden producirse económicamente y eficientemente piezas desde un material en bruto a un producto terminado.

Otros autores como la Asociación de Ingenieros Mecánicos de los Estados Unidos definen [BENGOA, G., 1998.] el CAPP como la determinación sistemática de métodos y los medios mediante los cuales un producto se fabricará de forma económica.

Anteriormente al CAPP, la manufactura intentaba superar el problema de la planificación manual de los procesos mediante una clasificación básica de las piezas en familias y desarrollar algún tipo de estandarización de planificación de

procesos para estas familias de piezas. Cuando una pieza nueva era introducida la planificación del proceso para esta familia era manualmente rescrita.

El CAPP desde sus inicios evolucionó como un tipo de almacén electrónico de planificación de procesos, que una vez creado, daba la posibilidad de recuperar y modificar debido a la introducción de una nueva pieza e imprimir la planificación hecha.

Este inicio del CAPP evolucionó en lo que se conoce ahora como el método de variantes asistido por computadoras. Realmente, este tipo de planificación está basado en la tecnología de grupo, codificando y clasificando para identificar una gran cantidad de atributos y parámetros de piezas. Estos atributos le permiten al sistema seleccionar una planificación de procesos inicial para la familia de piezas y lograr un noventa por ciento del trabajo de planificación. El diez por ciento restante es el esfuerzo que debe realizar el planificador para afinar la planificación. Las planificaciones de procesos almacenadas en la computadora previamente son introducidas manualmente en el PC y están basadas en la experiencia acumulada de muchos planificadores y tecnólogos [BENGOA, G., 1998].

Más tarde el CAPP evolucionó hacia el método generativo computarizado, que presupone la generación automática de la ruta tecnológica para una pieza determinada sin tomar en consideración rutas existentes de piezas similares. El método híbrido, es una combinación de los dos métodos anteriores.

Las técnicas de inteligencia artificial y en particular las basadas en el conocimiento, han aportado soluciones eficaces al problema, ellas han sido capaces de expresar la heurística comúnmente usada por los expertos humanos. Además, los sistemas basados en el conocimiento permiten una fácil actualización de la ruta tecnológica cuando cambian las facilidades de manufactura y surjan nuevos procesos. La dificultad mayor radica en la formalización del conocimiento declarativo y funcional relacionado con el problema [BENGOA, G., 1998].

**Tabla 1.1** Algunos prototipos de sistemas CAPP [NEDERBRAGT W., 2000], [XIANG, W., 2002], [SADAIAH M., 2002].

Nombre	Autor	Año	Características
AUTAPT	Profesor Eversheim Alemania	1990	No ha tenido mucho éxito comercial, debido al tremendo esfuerzo que hay que realizar para introducir toda la lógica específica de la empresa en el sistema, solo es para un tipo de máquina el torno.
DPPI	Walter Nederbragt, et al. NIST	2000	Cuenta con módulos de torneado y fresado, las piezas diseñadas son importadas del AutoCAD.
CAPP/ CNC	W. Xiang, et al., The Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong.	2002	Sistema para múltiples bloques hidráulicos.
PSG- CAPP	M. Sadaiah, D. R. Yadav, P. V. Mohanram and P. Radhakrishnan, PSG College of Technology, Peelamedu, Coimbatore, India	2002	Está escrito en Visual Basic, se usa el SolidWorks para generar las piezas que deben ser prismáticas, cuenta con tres módulos; uno de reconocimiento de la pieza y el segundo y tercero para la selección de las máquinas, herramientas y parámetros de corte.
FP SUITE	EMMEGISOFT, Italia	2009	El sistema genera listas de mecanizado para el taller, planificando las actividades de los varios sectores, programando el almacenaje y la entrega, es dedicado especialmente para el programa de el diseño y el cálculo de las carpinterías
DIDA- CAPP	Fatronik, España	2009	Conjunto predefinido de operaciones de mecanizado de fresado y torneado. Cálculo instantáneo de los principales parámetros de corte.
MetCAP P	Technology Answers, Inc	1999- 2007	Está escrito en C++, tiene varios módulos de trabajo, uno que reconoce automáticamente las características de la pieza que viene importada de un sistema CAD. Otro modulo de fresado, torneado y taladrado.

En la actualidad existen más de 1000 prototipos de software CAPP, entre los que se destacan: GARI, TOM, SIPS, TURBO CAPP, CMPP, DCLASS, según Cecil [CECIL J., 1997]. Algunos con sus características se recogen en la Tabla 1.1.

El sistema GF-CAPP se basa en la generación de sistemas flexibles para la planificación de procesos asistidos por computador (CAPP) en piezas mecanizadas, toma en cuenta como factores: la arquitectura del sistema, la metodología de planificación y los modelos de información utilizados para almacenar datos y conocimientos [GONZÁLEZ, F, 2004].

En este trabajo se presenta un estudio sobre la aplicación del concepto de diseño basado en elementos característicos o “features” que incorporan los sistemas actuales de modelación sólida 3D. El propósito ha sido desarrollar una interface

que tiene por finalidad producir la integración de CAD y CAPP en un ambiente de diseño, de manera de incorporar la actividad de planificación de la fabricación de una pieza mediante un centro de mecanizado, se desarrolla en SolidWork 2001 [MONTECINOS, J., 2007].

### **1.2.3. Estudios relacionados con el tema**

En la investigación de MIKÓ se dividen las tareas en niveles jerárquicos. El primer nivel se denomina proceso de planificación preliminar, que es el nivel conceptual del proceso de planificación. Las tareas más importantes son (1) la preparación del proceso de planificación de la fabricación, la fabricación de piezas y el montaje, (2) corrección de los documentos de diseño desde el punto de vista de la fabricación, (3) selección del sistema de fabricación, (4) análisis de las tareas de fabricación, estimación de costos de fabricación y datos de tiempo. El objetivo de este artículo es definir estas tareas, las conexiones y un posible proceso de planificación preliminar de fabricación [MIKÓ, B., 1999].

Las técnicas tradicionales tienen un alcance muy limitado debido a la complejidad del problema de optimización. Debido al rápido desarrollo de la tecnología informática los algoritmos genéticos (AG), que son algoritmos de búsqueda robusta, son adecuados y eficaces herramientas para la optimización. En este proceso de trabajo los parámetros de planificación para el mecanizado de componentes de rotación están optimizados por un Algoritmo Genético de optimización desarrollada en el entorno Matlab. Aquí el tiempo de mecanizado es considerada como la función objetivo y las restricciones son: la capacidad de la máquina, los límites de velocidad de avance, la profundidad de corte, velocidad de corte, etc., el tiempo de mecanizado se reduce al mínimo a través de una serie de generaciones, al tiempo que algunos operadores genéticos se aplican en cada generación esto es tratado por [AHMAD, N., 2001].

Según KORKUT, las soluciones con la ayuda de sistemas CAD / CAM se utilizan para la solución de problemas encontrados en el diseño de piezas. Inicialmente, una pieza fue modelada como sólidos y entonces este modelo sólido se convirtió en un modelo de superficie. Para la pieza diseñada, la planificación de procesos

asistidos por computadora (CAPP) se llevó a cabo y los códigos CNC fueron generados. Los códigos de CNC fueron enviados a una fresadora DYNA-2900 CNC [KORKUT, İ., 2003].

Por su parte, SRINIVASAN plantea el problema de minimización de las tolerancias como un problema mixto no lineal en enteros de programación y se solucionó mediante un empleo de Algoritmos Genéticos (GA). La codificación de GA empleado genera las tolerancias y la asignación del proceso de maquinado viable para cada una de las operaciones de mecanizado de la pieza [SRINIVASAN, S., 2003].

AMAITIK *et al.* presentan un sistema de fabricación inteligente (ST-Fipps) que integra el diseño y el proceso de planificación. En la etapa de diseño un modelador de características basadas en pasos (STEP-FM) ha sido desarrollado para la modelización de elementos geométricos. La pieza diseñada luego se exporta en formato de datos STEP XML, que se pueden pasar directamente al proceso de planificación sin necesidad de utilizar una función de reconocimiento de proceso complejo. En el proceso de planificación, un sistema híbrido inteligente de planificación (ST-FeatCAPP) ha sido desarrollado. Este código contiene todos los datos necesarios para producir la pieza diseñada [AMAITIK, S., KILIÇ, E., 2004].

LIU *et al.* presentan un enfoque híbrido CAPP que utiliza las normas basadas en el conocimiento y las reglas geométricas por razonamiento. Los aportes de esta investigación consiste en: (1) determinar las limitaciones de mecanizado basadas en el conocimiento, (2) características de agrupación de mecanizado en configuraciones basadas en la herramienta y (3) secuenciación características dentro de cada instalación a través del razonamiento geométrico. El enfoque desarrollado se ha implementado como el módulo generador de secuencia en un sistema distribuido de proceso de planificación y se valida a través de un caso de estudio [LIU, Z., WANG, L., 2006].

STAMPFER *et al.* ofrece una reseña de las tareas típicas que se deben resolver durante el proceso de planificación en elementos geométricos, presentó un método para solucionar la localización adecuada y fijación de las superficies de la



pieza de trabajo, un esbozo de un proceso integrador y un sistema de planificación de posiciones [STAMPFER, M., RÉTFALVI, A., 2006].

[ISMAIL, N., 2008] explora las capacidades de los algoritmos genéticos en el manejo de la optimización de las cuestiones críticas de un CAPP a los efectos de la planificación del proceso de fabricación en las actividades de fabricación reconfigurable. Dos algoritmos genéticos son concebidos y empleados para brindar la mejor aproximación a la solución del proceso de planificación. Las modificaciones incluyeron la adaptación de los operadores genéticos para el conocimiento del problema específico y la aplicación de una heurística específica para mejorar la eficiencia de búsqueda.

HARIK *et al.* presentan una revisión de la cadena de producción y a continuación ofrece una revisión de los software de planificación asistida por computadoras (CAPP) y sus puntos de fracasos [HARIK, R., DERIGENT, W., RIS, G., 2008].

HASSAN *et al.* proponen un enfoque CAPP para desarrollar la relación calidad y proceso de planificación conceptual basada en los costos. Este enfoque tiene por objeto determinar los recursos clave del proceso con la estimación de los costos de fabricación, teniendo en cuenta el riesgo de costo asociado con el plan de proceso. Puede servir como una metodología útil para apoyar toma de decisiones durante la fase inicial de planificación del ciclo de desarrollo de productos. Además despliega la función de Calidad utilizada para seleccionar alternativas de los procesos [HASSAN, A., SIADAT, A., DANTAN, J., MARTIN, P., 2009].

Todos estos sistemas CAPP por sus características no responden a las necesidades de nuestras industrias ya que tienen como principales inconvenientes:

1. Son muy específicos para determinada solución o empresa.
2. Están orientados a las tecnologías de punta CNC.

La dificultad en el desarrollo de sistemas CAPP confiables se atribuye a la naturaleza cualitativa de muchas de las decisiones involucradas en concebir una

tecnología y al gran número de variables que interactúan con el tecnólogo que tiene que considerar. Se puede establecer algunas analogías entre las fases del diseño conceptual y las fases del proceso de manufactura. Muchos de estos sistemas no toman en cuenta la síntesis de tolerancias como un criterio importante a considerar.

### **1.3 Conclusiones**

- La revisión bibliográfica demuestra la necesidad de realizar estudios e investigaciones relacionadas con la integración de los diferentes enfoques de la síntesis de tolerancias con los sistemas de apoyo a la planificación de la producción asistida por computadoras (CAPP).
- Al garantizar la integración de la síntesis de tolerancias en los sistemas CAPP los diseñadores serán capaces de predecir cuantitativamente los efectos de las tolerancias en el rendimiento y posibilitará la reasignación de las mismas, con el objetivo de disminuir los costos y aumentar la calidad del producto.

## 2 MÉTODO DE INTEGRACIÓN DE LA SÍNTESIS DE TOLERANCIAS EN LOS SISTEMAS CAPP

Este Capítulo tiene por objetivo mostrar el desarrollo de un método de integración de la síntesis de tolerancias con el proceso de planificación asistido por computadoras (CAPP).

### 2.1 Integración del diseño y la planificación del proceso en el maquinado

En general, en el proceso de diseño se toma en consideración la eficiencia del proceso de fabricación con la tecnología disponible. Una vez diseñado el producto, la planificación del proceso de fabricación necesariamente se subordina al mismo por una estructura centralizada, dada la necesidad de producir con la exactitud requerida el producto diseñado. El sistema CAPP es el encargado de generar las diferentes opciones de tecnologías de fabricación en las máquinas-herramienta, en calidad de propuestas al tecnólogo encargado del taller (Figura 2.1).



**Figura 2.1.** Esquema del sistema CAD/CAPP propuesto.

## **2.2 Método de integración de la síntesis de tolerancias en los sistemas CAPP**

Para resolver las tareas del aseguramiento de la exactitud en las distintas fases de la creación de la máquina hay que tener las ecuaciones que describan la formación del eslabón de cierre de la cadena dimensional. Si se trata de la fase de diseño de la máquina, los cálculos estarán referidos a los campos de tolerancia de las dimensiones, es decir, a los campos tolerables de dispersión de dimensiones de las piezas o máquinas que consideran convenientes para cumplir su destino de servicio.

En la práctica los problemas a resolver con la ayuda de las cadenas dimensionales se presentan de dos formas las cuales se denominan:

- Síntesis (tarea directa).
- Análisis (tarea inversa).

La síntesis consiste en que, al conocer la exactitud necesaria del eslabón de cierre, se fijan o determinan la del resto de los eslabones. El análisis, consiste en que al conocer la exactitud de todos los eslabones componentes, se determina la del eslabón de cierre. La síntesis se soluciona, durante el diseño, cuando se conoce la magnitud de un índice de exactitud de la máquina y se determina la exactitud necesaria de todas las piezas que participan, por sus dimensiones, en la formación de dicho índice.

En la fase de producción el tecnólogo también soluciona la síntesis, al proyectar los procesos tecnológicos nuevos, para determinar la exactitud de las máquinas herramienta y otros equipos tecnológicos necesarios para lograr la exactitud de la pieza elaborada. En la fase de control de la máquina terminada y de sus piezas, se determina tanto la exactitud necesaria de los instrumentos y dispositivos de medida, como el error tolerable de medición.

Teniendo en cuentas estos requerimientos se plantea el siguiente método para la integración de la síntesis de tolerancias en los sistemas CAPP que será descrito a continuación:

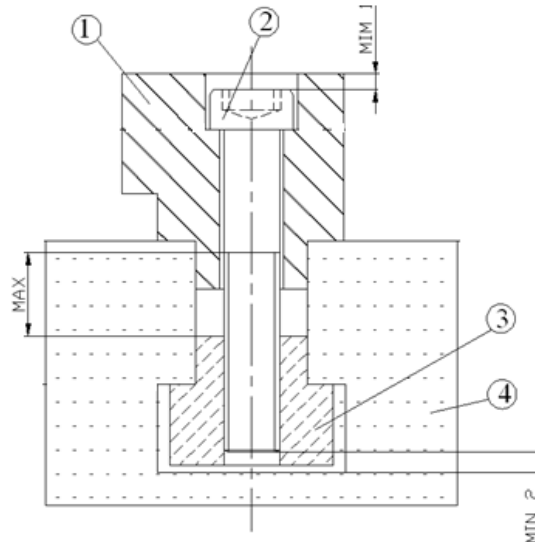
1. Identificación y caracterización de los requerimientos funcionales y las tolerancias.
2. Modelación del ensamble (formación y evaluación de las cadenas dimensional) en el diseño conceptual.
3. Cálculo y corrección de las tolerancias dimensionales (Síntesis de tolerancias).
4. Selección de las piezas a fabricar.
5. Determinación de los procesos de mecanizado y métodos de elaboración.
6. Determinación del tipo de colocación.
7. Determinación de la secuencia de mecanizado.
8. Selección de las máquinas-herramienta.
9. Selección de las herramientas de corte.
10. Determinar los datos de corte.
11. Obtención de la información tecnológica.

### **2.2.1 Identificación y caracterización de los requerimientos funcionales y las tolerancias**

Esta etapa consiste en identificar y caracterizar los requerimientos funcionales ya que estos se consideran como el modo más adecuado para capturar las intenciones funcionales del diseñador relacionados con las tolerancias, además de considerarse como un vínculo de información entre las diferentes etapas que conforman el ciclo de vida de un producto.

La caracterización de los requerimientos funcionales relacionados con las tolerancias se inscriben en requerimientos de tipo lineales y que generan ciclos o lazos abiertos. El método utiliza una simbología que permite al diseñador identificar en un dibujo de conjunto mecánico, cuáles son los requerimientos funcionales o intenciones de diseño. A partir de identificar y capturar toda la información indispensable del usuario relacionado con las tolerancias dimensionales del producto en el plano de ensamble, se identifican las piezas y

superficies con importancia funcional indispensable para el cumplimiento de los requerimientos. En la Figura 2.2 se muestra un ejemplo de lo planteado anteriormente.



**Figura 2.2.** Caso de un conjunto con requerimientos funcionales dimensionales.

A continuación se expondrá un método para capturar en un gráfico estos requerimientos, modelar el proceso de ensamble y permitir la síntesis de tolerancias en conjuntos mecánicos.

### **Modelo de integración del método de las burbujas para la modelación del ensamble con el cálculo de la síntesis de tolerancias**

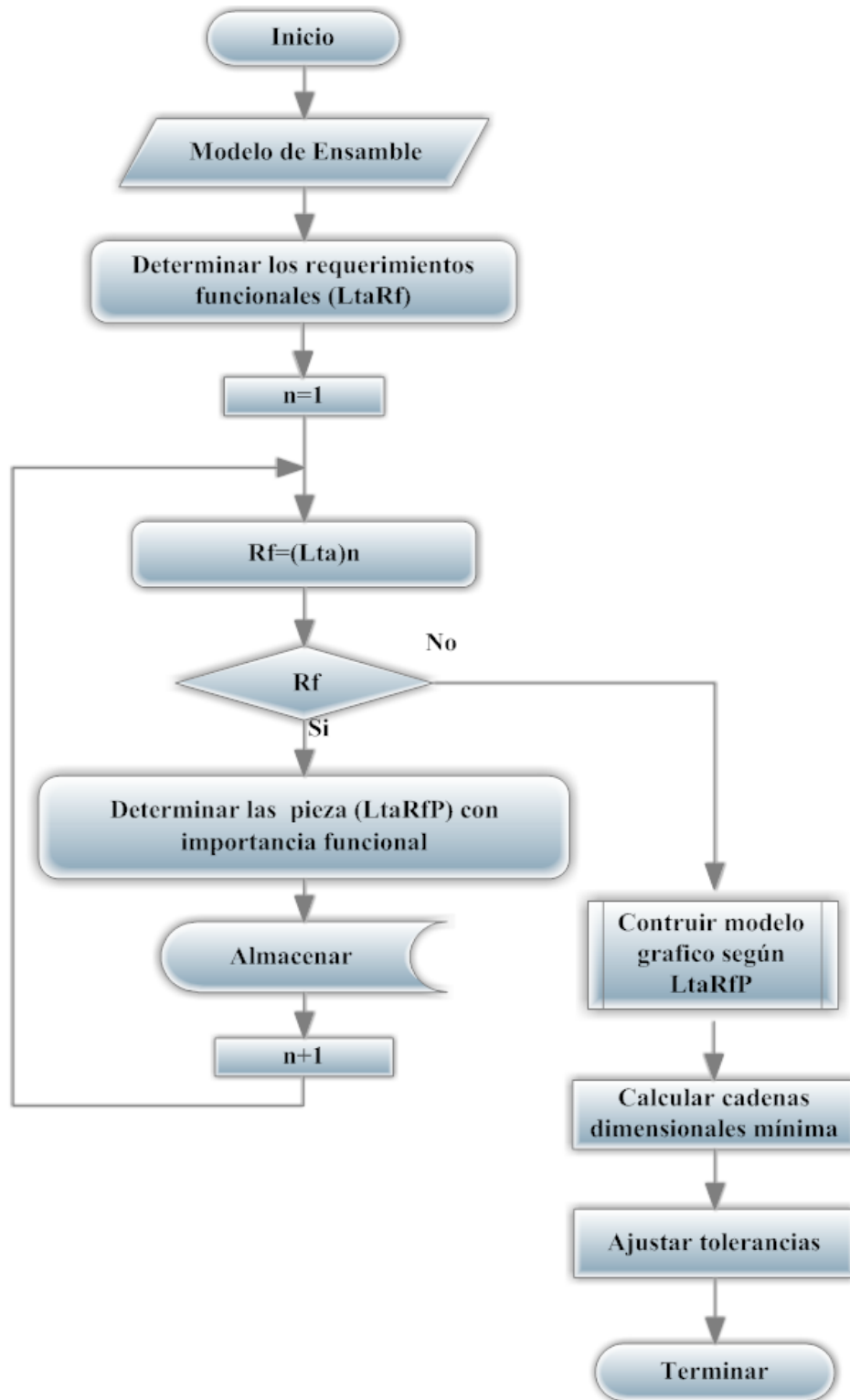
A continuación se muestra un método denominado método de las burbujas que integra a los requerimientos funcionales de forma coherente en un modelo de ensamble para entornos. De forma general, el procedimiento a seguir para construir el método de las burbujas se puede detallar en forma secuencial, siguiendo los siguientes pasos:

- a) Identificar los requerimientos funcionales en el ensamble.
- b) Identificar las piezas o elementos funcionales que garantizan el desempeño del conjunto mecánico. En este paso, para cada requerimiento identificado en el paso a, se deben de identificar cuáles son las piezas con importancia desde el punto de vista funcional. Se sugiere utilizar una nomenclatura numérica en

orden ascendente. En esta etapa de identificación, a cada pieza seleccionada se le asocia un número con el propósito de identificar cuáles piezas del conjunto son representadas en el modelo.

- c) Identificar en cada una de las piezas con importancia funcional las características que permiten el cumplimiento de los requerimientos funcionales en las piezas. Se sugiere utilizar una nomenclatura en orden alfabético creciente para cada pieza.
- d) Construir un gráfico que represente las interacciones y los requerimientos funcionales del ensamble.
- e) Formular la ruta o cadena dimensional que garantice el cumplimiento de cada requerimiento. Una vez que el modelo gráfico ha sido obtenido, la ruta o cadena dimensional puede ser identificada fácilmente.
- f) Evaluar la cadena dimensional propuesta.
- g) Calcular y corregir las tolerancias dimensionales.

En el algoritmo de extensión del método de las burbujas con la síntesis de tolerancias se estructura el procedimiento anteriormente descrito, como se muestra en la Figura 2.3 comienza con la obtención de datos del modelo de ensamble (cantidad de piezas, dimensiones, etc.), luego se determinan y se almacenan los requerimientos funcionales en una lista (LtaRf), seguido se seleccionan por cada requerimiento las piezas con importancia funcional y se almacenan en una lista (LtaRfP), continua el algoritmo construyendo el modelo grafico del ensamble con las diferentes relaciones establecidas entre las piezas con importancia funcional, para determinar la cadena dimensional por cada requerimiento funcional y por último se distribuyen las tolerancias por el método de los peores casos, se reasignan por el método de escala proporcional y se termina el algoritmo.



**Figura 2.3.** Extensión del método de las burbujas [PÉREZ R., R., 2006] con la síntesis de tolerancias.

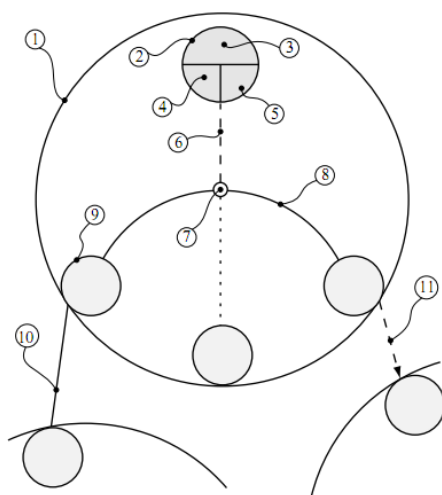


### **Construcción del gráfico que representa las interacciones y los requerimientos funcionales del ensamble mecánico**

El elemento básico del gráfico que representa las interacciones y los requerimientos funcionales del ensamble, lo constituye el nodo o burbuja. Un nodo o burbuja es un círculo que contiene la información necesaria para obtener las cadenas de cotas en la etapa del diseño conceptual. Cada burbuja representa una pieza y en su interior se representan cuáles características de la pieza son relevantes desde el punto de vista funcional, así como sus relaciones.

A partir de la identificación de los requerimientos funcionales y de las piezas que garantizan un adecuado desempeño del conjunto mecánico, los nodos se construyen con facilidad. A continuación se describe el primero de los gráficos para los casos de requerimientos funcionales dimensionales.

En la Figura 2.4 se muestra la configuración básica de cada nodo —un nodo por cada pieza del conjunto mecánico que se analice— para la familia de las tolerancias dimensionales. La burbuja resulta muy útil para la construcción del gráfico, el cual será utilizado para obtener las cadenas dimensionales.



**Figura 2.4.** Método de la burbuja para los requerimientos funcionales dimensionales [PÉREZ R., R., 2006].

Una de las principales ventajas de la utilización de modelos gráficos genéricos, como es el caso del método de la burbuja, es que permiten reducir

considerablemente el tiempo empleado en la elaboración de las rutas o cadenas dimensionales. A continuación se describe la anatomía o estructura del método de la burbuja para los casos de los requerimientos funcionales dimensionales representado en la Figura 2.4.

- (1) Nodo principal de la capa. Para cada capa del ensamble existirá un nodo principal, que contiene en su interior toda la información relacionada con los requerimientos funcionales y sus relaciones con las demás piezas.
- (2) Nodo de identificación de la capa o pieza de la estructura funcional. Es un nodo en forma circular que representa a una determinada pieza del conjunto mecánico que se analiza.
- (3) Identificador de la pieza. Representa un identificador por cada pieza del conjunto mecánico.
- (4) Contador de condiciones funcionales. Este indicador controla el número de condiciones funcionales en las que participa este nodo, al indicar la importancia funcional dentro del conjunto mecánico.
- (5) Identificador de las condiciones de ensamble. Este identificador permite conocer cuáles son las condiciones funcionales que debe de cumplir este nodo respecto al ensamble.
- (6) Vínculo nodal. Permite la unión entre el nodo de identificación de la capa y el nodo de relación. Se representa a través de una línea recta discontinua.
- (7) Nodo de relación. Este nodo permite vincular las características funcionales geométricas de la pieza. Todas las características importantes de una determinada pieza deben de estar vinculadas a este nodo a través de un vínculo geométrico.
- (8) Vínculo geométrico. Este vínculo permite expresar las relaciones geométricas entre las diferentes características de la pieza. Se representa a través de un arco continuo entre el nodo de relación y el nodo de la característica en cuestión.
- (9) Nodo de la característica  $i - j = 1 \dots n$ . Este nodo identifica a una determinada característica de la pieza que se analiza. Cada característica importante de la

pieza, desde el punto de vista funcional, debe de ser representada a través de un nodo de característica. Se sugiere utilizar una nomenclatura en orden alfabético ascendente para cada nodo de la característica.

(10) Vínculo de ensamble. Permite expresar la unión o relación que existe entre las características pertenecientes a diferentes piezas o nodos de identificación de las capas. Se representa a través de una línea recta continua entre nodos de características pertenecientes a diferentes piezas.

(11) Vínculo funcional. Permite representar las diferentes condiciones funcionales que debe de cumplir el conjunto mecánico para un desempeño adecuado. El vínculo se indica a través de un vector en líneas discontinuas y con una etiqueta que representa al requerimiento. El sentido del vector indica el orden o secuencia a seguir para la elaboración de la ruta o cadena dimensional.

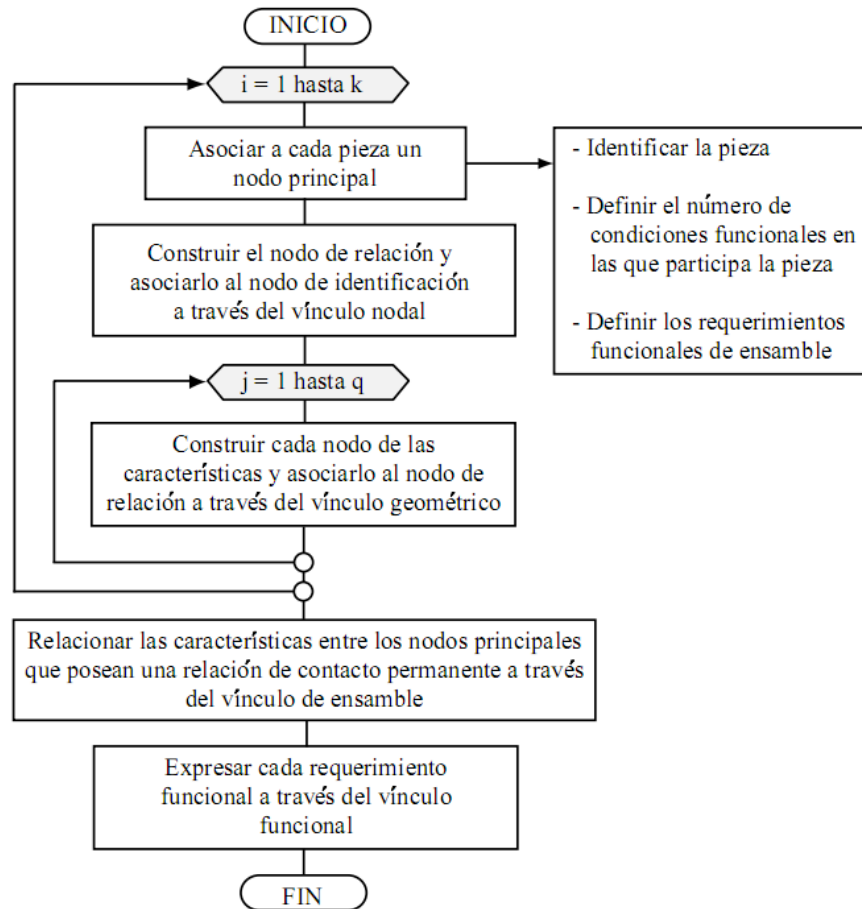
La construcción del método gráfico para los requerimientos funcionales dimensionales se puede representar a través de un algoritmo, como muestra la Figura 2.5.

En esta Figura,  $k$  representa la cantidad de piezas con importancia desde el punto de vista funcional en el ensamble y  $q$  representa el número de características relevantes para cada pieza que garantizan el desempeño del producto.

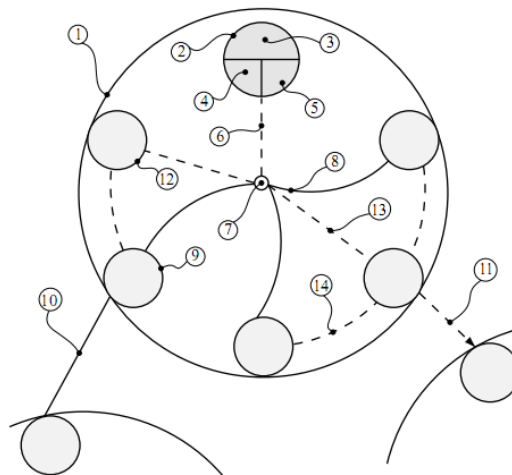
En los casos donde aparezcan requerimientos funcionales de coaxialidad, de concentricidad, de perpendicularidad y de angularidad; o de paralelismo máximo en conjuntos mecánicos con piezas cilíndricas, se utilizará el modelo expuesto anteriormente con algunas modificaciones. En la Figura 2.6 se puede apreciar la estructura o anatomía del método de la burbuja para estos casos.

Respecto al gráfico para el primer tipo de gráfico, sólo se adicionan tres nuevos elementos al modelo, que son los siguientes:

(12) Nodo del eje. Este nodo permite identificar a los diferentes ejes con importancia desde el punto de vista funcional en el nodo principal.



**Figura 2.5.** Etapas para la construcción del gráfico para el caso de los requerimientos funcionales dimensionales [PÉREZ R., R., 2006].



**Figura 2.6.** Etapas para la construcción del gráfico para el caso de los requerimientos funcionales geométricos [PÉREZ R., R., 2006].

(13) Indicador de eje. Permite relacionar a cada uno de los ejes representados en el nodo principal con el nodo de relación. Se representa por un línea recta discontinua.

(14) Indicador de pertenencia. Permite mostrar a que característica en específico pertenece el eje representado por el nodo (12). Se representa a través de un arco discontinuo entre el nodo de la característica y el eje que le corresponde.

Una vez construido el gráfico por el método de las burbujas, las cadenas dimensionales pueden ser identificadas de una manera fácil.

### **2.2.2 Cálculo y corrección de las tolerancias dimensionales**

Si el proceso de fabricación de una pieza es conocido como el torneado, estampado, etc., la distribución de las tolerancias podrán ser seleccionadas siguiendo las guías o normas establecidas. La asignación de las tolerancias en los ensambles puede ser predicha mediante la síntesis de las tolerancias. La base de la síntesis de las tolerancias en el diseño es un modelo analítico de la distribución de tolerancias en el montaje mecánico de las piezas componentes.

#### **Método Worst case (peores casos)**

En el análisis de los peores límites, las tolerancias del ensamble ( $T_{ASM}$ ) es determinada por la suma de las tolerancias de cada componente ( $T_i$ ) linealmente. Cada dimensión del componente es asumida que estará entre los límites máximo y mínimo, resultando en el peor de los casos no estar dentro de los límites del ensamble según (1) y (2).

Ensamblados de una dimensión:

$$T_{ASM} = \sum T_i \quad (1)$$

Ensamblados multidimensionales:

$$T_{ASM} = \sum (|\partial f / \partial x_i| T_i) \quad (2)$$

Donde:  $X_1$ : es la dimensión nominal del componente;  $f(X_i)$ : es la función del ensamble que describe la dimensión resultante del ensamble, como el juego o la interferencia.

Las derivadas parciales representan la sensibilidad de las tolerancias del ensamble para cada componente individual.

### **Asignación mediante escala proporcional**

El diseñador comienza mediante la asignación de tolerancias razonables a los componentes basado en el proceso o en guías de diseño. Luego se suman las tolerancias de los componentes para ver si cumplen con las especificaciones del montaje de la tolerancia. Si no, se escalan las tolerancias de los componentes por un factor de proporcionalidad constante. De este modo, las magnitudes relativas a las tolerancias de los componentes son conservadas.

En la Tabla 2.1 se representan los rangos de tolerancias según los procesos de maquinado.

### **2.2.3 Selección de las piezas a fabricar**

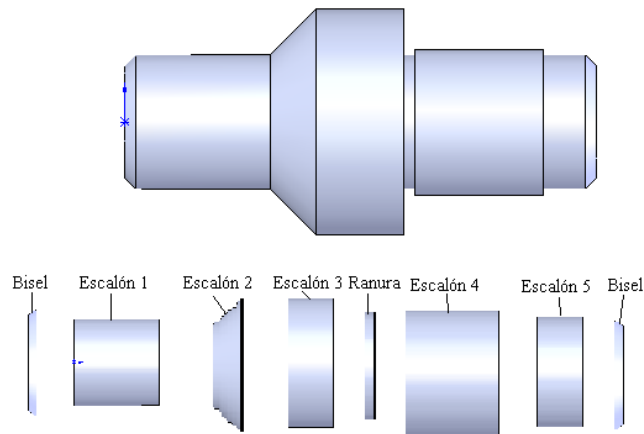
La tarea de elaboración de tecnologías de maquinado constituye un elemento del sistema de diseño y fabricación de piezas. De tal forma, la búsqueda de los objetos (piezas) consiste en primer lugar, en la definición del conjunto de piezas para los que se diseña el sistema. En este caso se efectuará para piezas rotacionales por su nivel de utilización. Ahora bien, como se ha fundamentado en acápites anteriores las piezas constituyen diferentes combinaciones de elementos de forma. En otras palabras, la descomposición espacial de la tarea de diseño de piezas conduce a sub-tareas de diseño de conjuntos de elementos de forma.

Las piezas constituyen diferentes combinaciones de elementos de forma, cada elemento de forma posee un método o función capaz de calcular el volumen necesario a remover partiendo de la pieza en bruto hasta llegar a su forma final o intermedia. Esto es lo que se considera como descomposición en volúmenes de maquinado. Por supuesto, hay que destacar que los volúmenes a maquinar están

restringidos por la colocación que se realice de la pieza. En la Figura 2.7 se muestra un ejemplo de estos elementos.

**Tabla 2.1.** Rango de tolerancias en el proceso de maquinado [CHASE, K.W., 1999].

Rango de dimensiones		Tolerancias +/-								
De	A									
0,00	5,99	0,00015	0,00020	0,00030	0,00050	0,00080	0,00120	0,00200	0,00300	0,00500
6,00	9,99	0,00015	0,00025	0,00040	0,00060	0,00100	0,00150	0,00250	0,00400	0,00600
10,00	14,99	0,00020	0,00030	0,00050	0,00080	0,00120	0,00200	0,00300	0,00500	0,00800
15,00	27,99	0,00025	0,00040	0,00060	0,00100	0,00150	0,00250	0,00400	0,00600	0,01000
28,99	44,99	0,00030	0,00050	0,00080	0,00120	0,00200	0,00300	0,00500	0,00800	0,01200
45,00	77,99	0,00040	0,00060	0,00100	0,00150	0,00250	0,00400	0,00600	0,01000	0,01500
78,00	135,99	0,00050	0,00080	0,00120	0,00200	0,00300	0,00500	0,00800	0,01200	0,02000
136,00	209,99	0,00060	0,00100	0,00150	0,00250	0,00400	0,00600	0,01000	0,01500	0,02500
Lapeado, pulido										
Rectificado										
Brochado										
Escariado										
Torneado, planeado										
Fresado										
Taladrado										



**Figura 2.7.** Ejemplos de elementos de forma.

#### **2.2.4 Determinación de los procesos de mecanizado y métodos de elaboración**

Se debe seleccionar el proceso adecuado para satisfacer las exigencias debido a las tolerancias y al acabado superficial teniendo en cuenta el tipo de superficie a maquinar. En esta etapa de la proyección tecnológica hay que asegurar que los métodos de elaboración utilizados garanticen los requisitos y exigencias técnicas indicadas en el plano constructivo de la pieza.

Los métodos que se escojan deben corresponder con el tipo de producción, para garantizar la mayor economía del proceso tecnológico, además de ajustarse necesariamente al equipamiento disponible, esto se ejecuta a través de tablas elaboradas por investigaciones experimentales y la experiencia de los profesionales alcanzada a través del vínculo directo con el proceso.

Especial atención deben de tener las restricciones geométricas porque definen el tipo de mecanizado necesario y la precisión del posicionamiento. Hay que tener en cuenta los errores de forma y posición, así como la rugosidad superficial.

#### **2.2.5 Determinación del tipo de colocación**

Los elementos de sujeción son dispositivos para posicionar y sujetar firmemente una pieza o un conjunto de piezas respecto a un sistema de referencia de una máquina, para que puedan ejecutarse las operaciones de fabricación necesarias



conforme a las especificaciones de diseño y la planificación del proceso. Como características fundamentales deben tener precisión y productividad para fabricación no unitaria.

Los elementos de sujeción más difundidos son los siguientes:

- sujeción entre puntos (fijos, de resorte, móviles); dispositivos de arrastre (perros, punto frontal).
- sujeción concéntrica (platos de garras, boquillas de resorte (arrastre, empuje), sistema Ringspann (arandelas cónicas, de acero para resortes)).
- tornillo de presión; tuerca; perno de argolla; mordazas (planas, auto-centrantes, múltiples, universales; garras fijas, basculantes, flotantes, con retroacción).
- bridas de sujeción (deslizante / giratoria; inter-esfuerzo / inter-apoyo / inter-apriete; transversales / giratorias).
- cuñas, topes tangentes; palancas excéntricas; palancas de sujeción; gatos de empuje (leva, hidráulico).
- sujeción magnética (platos, mandrinos...); limitadores de sujeción (resortes, arandelas Belleville...).

El proceso de colocación de una pieza en la máquina herramienta es un proceso complejo porque requiere de mucha experiencia. Los ensambles objetos de estudio refieren la fabricación de piezas rotacionales, teniendo en cuenta los tipos de colocación que se seleccionan en función de las tolerancias geométricas fundamentales. Las colocaciones en las máquinas tipo torno son las siguientes:

- Plato.
- Plato y punto.
- Plato y luneta.
- Plato, luneta y punto.
- Punto con perro de arrastre y punto.
- Punto de garra y punto

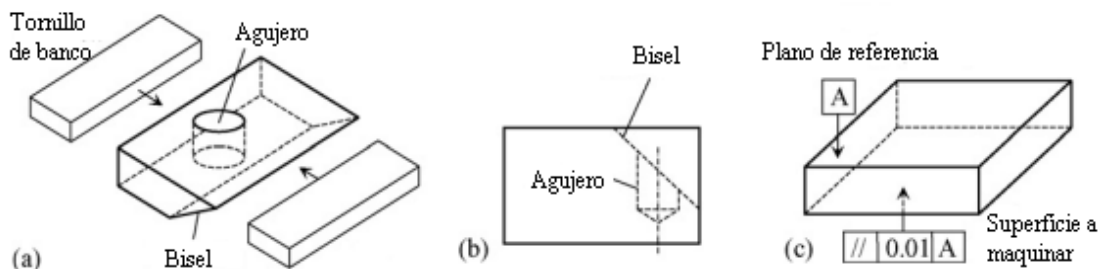
— Punto con perro de arrastre, luneta y punto.

### 2.2.6 Determinación de la secuencia de mecanizado

Las restricciones de precedencia en el maquinado aseguran los requerimientos del diseño, satisfacen las restricciones específicas de los recursos de manufactura y la tecnología del maquinado. La precedencia en el maquinado puede resumirse como las interacciones de fabricación entre los elementos de forma (features). Se clasifican en:

- a) Interacciones de fijación: la colocación o apoyo de las superficies para el maquinado de una superficie es destruida por una operación de maquinado efectuada antes.
- b) Interacciones de las herramientas: la colocación requerida de la herramienta de corte en una superficie es afectada por el maquinado de una superficie de referencia efectuada antes.
- c) Interacciones de tolerancia: para ubicar una pieza para el maquinado o la inspección, es necesario usar superficies como planos de referencia, esta interacción ocurre cuando estas superficies son destruidas por una operación anterior.

En la Figura 2.8 se muestran ejemplos de estas reglas. En la Figura 2 (a) el agujero debe ser maquinado antes del bisel, de lo contrario no puede ser fijado; en la Figura 2 (b) para posicionar la herramienta de taladrado correctamente, el taladrado del agujero debe preceder al maquinado del bisel y en la Figura 2 (c) el plano de referencia debe ser maquinado antes que la otra superficie.



**Figura 2.8.** Interacciones de fabricación.

Al establecer la sucesión de las operaciones hay que considerar lo siguiente:

1. Es preciso maquinar las superficies de las piezas que son las bases para el trabajo posterior.
2. Hay que maquinar las superficies de las cuales se maquina la capa de metal de mayor espesor.
3. Las operaciones donde exista la probabilidad de desechos a consecuencia de defectos en el material o complejidad del maquinado, estas deben de ejecutarse al principio del proceso.
4. La sucesión de las operaciones se establecen en función de la precisión requerida de la superficie, cuanto más precisa debe ser la superficie, tanto más tarde deberá ser maquinada ésta, ya que el maquinado de cada superficie siguiente puede provocar una alteración de la superficie maquinada antes.
5. Las superficies que deben ser más precisa y con rugosidad, deben maquinarse de últimas, ello excluye o bien disminuye la posibilidad de alteración de las dimensiones y defectos en las superficies maquinadas. Si tales superficies fueron trabajadas antes y después se realizaron otras operaciones, se deben de maquinar nuevamente, para el acabado definitivo.
6. La combinación del maquinado de desbaste y acabado en una misma máquina- herramienta puede llevar a la disminución de la precisión de la superficie maquinada, a causa de la influencia de considerables fuerzas cortantes y de apriete durante el maquinado de desbaste.

### **2.2.7 Selección de las máquinas-herramienta**

Durante la proyección tecnológica debe seleccionarse para cada operación la máquina herramienta que garantice la obtención de los requisitos técnicos y de exactitud de la pieza de la forma más racional y económica posible. Para escoger el modelo de la máquina es necesario hacer una valoración de aspectos como: el volumen de producción; los requisitos de exactitud y los acabados superficiales; los métodos de obtención de las piezas en bruto; el peso de la pieza, dimensiones de la pieza, entre otros.

El volumen de producción determina el grado de automatización del equipamiento a utilizar. Para producciones en grandes series y masivas se deben escoger máquinas semiautomáticas o automáticas que reducen los gastos de tiempos auxiliares durante la elaboración y permiten el empleo de obreros de más baja calificación. Para volúmenes pequeños se debe escoger el equipamiento universal.

En cuanto a los requisitos de exactitud y acabado superficial, mientras más exactas sean las superficies de las piezas y mayores sean las exigencias de rugosidad superficial, más precisa deberá ser la máquina herramienta a utilizar.

El tipo de pieza en bruto a emplear limita la selección del equipamiento, fundamentalmente en los casos de piezas en bruto forjadas y fundidas, ya que estas piezas tienen en la mayoría de los casos una distribución no uniforme de su masa. Sin embargo, las piezas laminadas ofrecen mayores posibilidades de selección del equipamiento por poseer simetría axial. Para maquinar piezas pesadas y de grandes dimensiones se deberán escoger máquinas robustas que aseguren buena sujeción y que tengan la potencia necesaria para el corte en otro caso, se escogerán equipos ligeros.

Sobre la base de la generalización de los aspectos analizados se confecciona la ruta tecnológica para la elaboración de la pieza que se detalla en las documentaciones tecnológicas conforme a las normas de empresa, estatales o internacionales.

En resumen, la elección de la máquina se realiza bajo la base de los siguientes razonamientos:

- Correspondencia de las dimensiones principales de la máquina- herramienta con las dimensiones exteriores de la pieza a maquinar.
- Concordancia de la productividad de la máquina con la cantidad de piezas que deben ser maquinadas durante un periodo de tiempo.
- Empleo lo más completo posible de la máquina- herramienta según su potencia y el tiempo.

### 2.2.8 Selección de las herramientas de corte y de los parámetros de corte

La selección de las herramientas de corte es un paso muy importante en la elaboración de las tecnologías de mecanizado, ya que influye decisivamente en la productividad y en la calidad de las piezas mecanizadas.

No existe un procedimiento único para seleccionar herramientas. Existen numerosas recomendaciones en textos de diferentes autores y catálogos de fabricantes, además de la experiencia propia de cada colectivo laboral. No obstante, hay ciertas ideas generales que pueden servir para cumplir esta tarea técnica, además de analizar los factores que influyen en la toma de decisiones. Las características de la pieza a fabricar, el material, su forma o diseño, precisión y acabado superficial inciden en la selección del material cortante de la herramienta, su forma y geometría. Con estos elementos se parte para seleccionar el régimen de corte sin olvidar la máquina herramienta que se vaya a utilizar, ya que los datos de corte deben adaptarse a las posibilidades de la máquina en cuanto a potencia, avances y velocidades.

Este paso se realizará utilizando las recomendaciones de la SANDVIK Coromant [SANDVICK, 2002] para cada una de las herramientas seleccionadas, además de utilizar normas ISO 1832-1991. La clave está compuesta por once símbolos, aunque del octavo al undécimo se utilizan cuando es necesario. La elección de los símbolos de la clave se representa en la Tabla 2.2 y en la Figura 2.9.

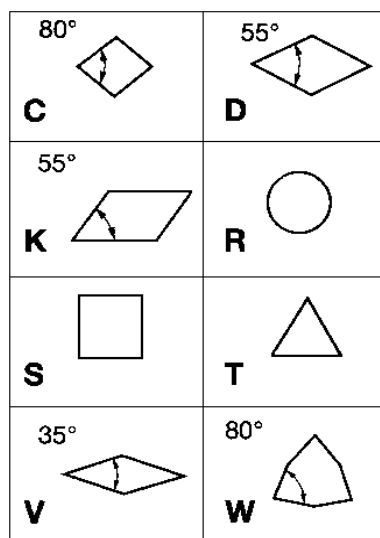
**Tabla 2.2.** Clave para la elección de la herramienta de corte [SANDVICK, 2002].

T	N	G	N	11	03	08	T	N	010	20	PF
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12

Según la Sandvik, la forma de la plaquita [SANDVICK, 2002] se clasifican en:

- C- rómbica de 80°, permite cilindrar y refrentar  $\varphi = 95^\circ$ .
- D- rómbica de 55°, permite cilindrar con  $\varphi = 93^\circ$  y hacer rebajes.
- V- rómbica de 35°, igual que D.

- K- trapecial de 55°.
- R- redonda, para cilindrado en general y rebajes.
- S- cuadrado, se usa con  $\varphi = 75^\circ$  ó  $45^\circ$  según el vástago en que se fije.
- T- triangular,  $\varphi = 93^\circ$ .
- W- trigonal, para cilindrar y refrentar con  $\varphi = 95^\circ$ .



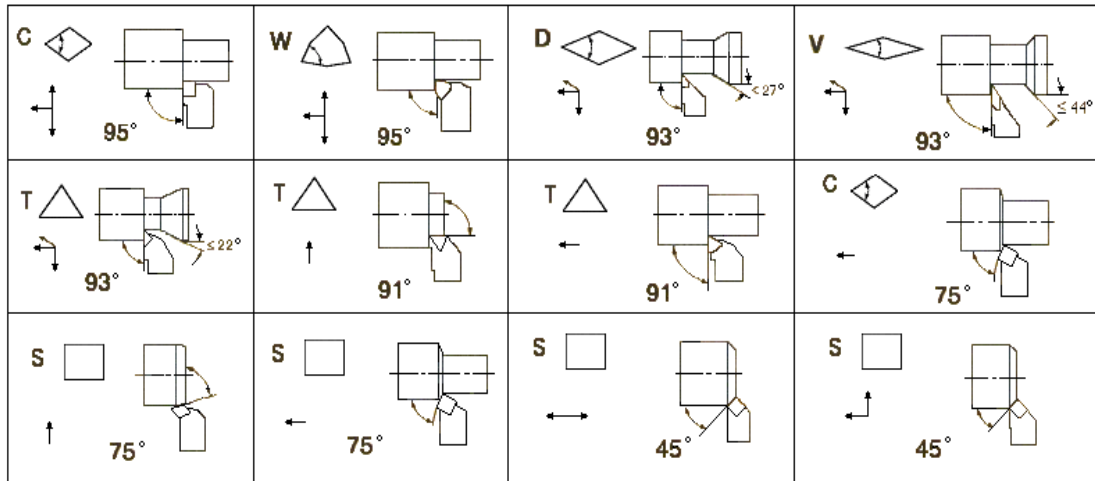
**Figura 2.9.** Forma de la plaquita [SANDVICK, 2002].

### Selección del porta plaquitas para el torneado

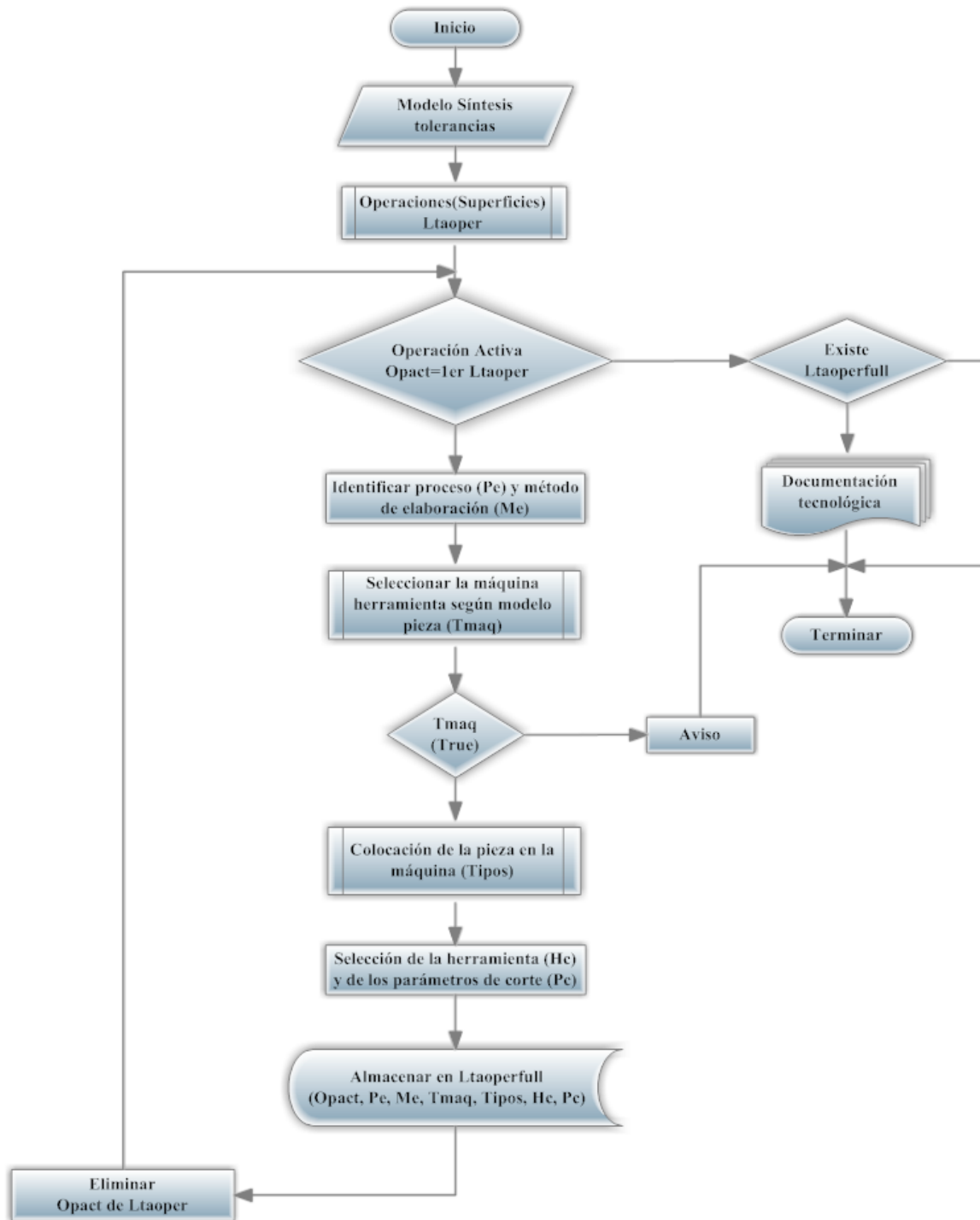
En la Figura 2.10 se muestran las formas de placas recomendadas según el paso tecnológico que se vaya a realizar [SANDVIK, 2002], [SANDVIK, 2004].

Lo descrito anteriormente se puede implementar al seguir los pasos que son estructurados en el algoritmo para determinar la ruta tecnológica (Figura 2.11) que comienza con la obtención de los datos ofrecidos por algoritmo descrito en la Figura 2.3, seguido se determinan las superficies a mecanizar y se almacenan en una lista (Ltaoper) para su posterior utilización. Se activa la operación y si existe se procede a identificar el proceso por el cual va a ser obtenida con su método de elaboración respecto a la forma de la pieza y las rugosidades superficiales, además de seleccionarse la máquina-herramienta para la operación activa, si existe la máquina-herramienta con las características necesarias para su utilización se procede a colocar la pieza, de lo contrario se emite un aviso y se termina el proceso. Luego se selecciona las características de la herramienta de

corte (forma, calidad, sistema de sujeción y sistema de herramienta) y los respectivos regímenes de corte asociados. Todos estos datos se almacenan en una lista general (Ltaoperfull) para generar la documentación tecnológica, terminado esto se elimina esta operación de la lista activa y se procede de la misma manera para las siguientes operaciones hasta que la lista este vacía para generar la documentación tecnológica almacenada en la lista general (Ltaoperfull).



**Figura 2.10.** Formas de plaquitas ( $f_p$ ) y ángulos de posición ( $\varphi$ ) [SANDVIK, 2004].



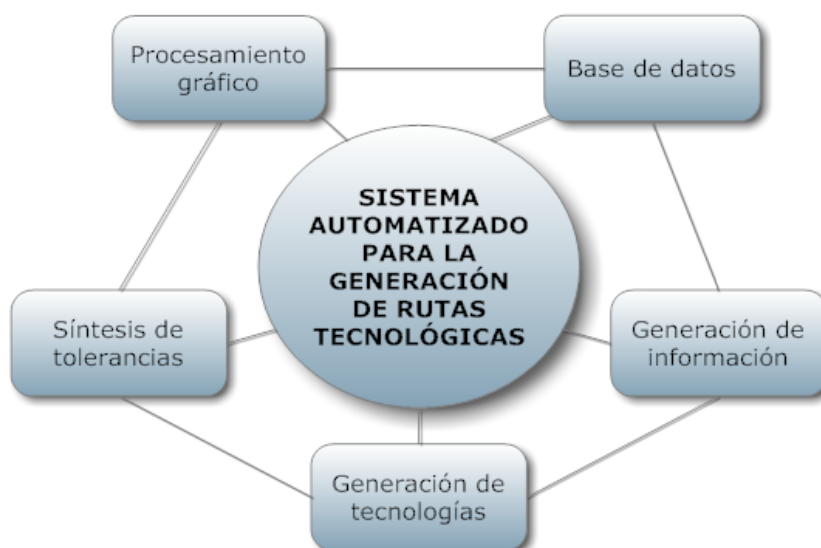
**Figura 2.11.** Algoritmo para determinar la ruta tecnológica.



### **2.3 Concepción de un sistema CAD/CAPP para la generación de variantes tecnológicas**

El método concebido en esta investigación está orientado para su implementación en una herramienta informática, con la finalidad de que todo el proceso se efectúe de manera automatizada, lo cual facilita al tecnólogo el proceso de toma de decisiones.

La disponibilidad de que el proceso de preparación para la fabricación transcurra en el mismo sistema CAD elegido crea mejores condiciones para la integración de los datos de diseño con los de la preparación para la fabricación del producto y permite el uso de un formato común para el tratamiento de la información gráfica. De esta manera, un sistema para la generación de variantes tecnológicas debe contar con un conjunto de partes o módulos integrados (Figura 2.12), los cuales en sus funciones específicas e interrelacionadas garantizan la generación de soluciones al problema en estudio.



**Figura 2.12.** Esquema de la composición o estructura de un sistema CAD/CAPP para la generación de rutas tecnológicas.

Los sub-sistemas que conforman el sistema CAD/CAPP propuesto son los siguientes:

Procesamiento gráfico: Encargado de interactuar con las diferentes entidades, formatos y objetos gráficos. Además, gestiona cada una de estas estructuras para que su información sea utilizada por otros módulos del sistema.

Base de datos: Encargado de almacenar y consultar determinadas estructuras de datos creadas por el sistema o importadas al mismo. Estas estructuras de datos deben obedecer a características de determinadas tecnologías, maquinas herramientas, materiales, piezas y herramientas de corte.

Síntesis de tolerancias: Encargado de transformar los requerimientos funcionales del diseño en la selección adecuada de las dimensiones y las tolerancias.

Generación de tecnologías: Es el que genera las diferentes variantes tecnológicas de cada pieza, para lo cual considera el proceso seleccionado.

Generación de información: Una vez definida la solución que se ejecutará, se describe tecnológicamente para su fabricación en correspondencia con la tecnología que empleará. Este módulo entrega la documentación descriptiva a través de planos e informes para la fabricación de la pieza.

Basado en esta estructura de sistema, se deben implementar los procedimientos descritos anteriormente para cada módulo, con el fin de garantizar la obtención de soluciones racionales, fiables y en espacios de tiempo que satisfagan los requerimientos del sistema productivo.

## **2.4 Conclusiones**

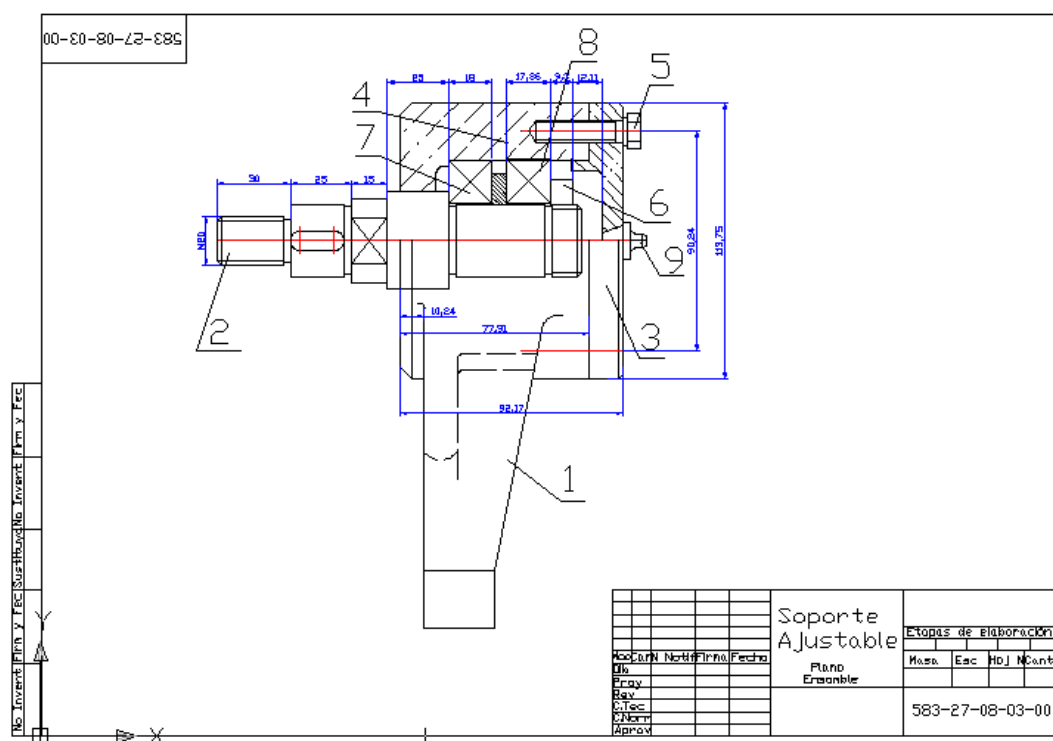
- Se desarrolló un método que integra la síntesis de tolerancias con los sistemas CAPP para la generación de rutas tecnológicas.
- Se elaboró el algoritmo general para el sistema de Planificación Asistida por Computadora (CAPP) para la generación de rutas tecnológicas.
- Se elaboró la concepción general del sistema para garantizar la correcta interpretación y procesamiento de los datos introducidos.

### 3 CASO DE ESTUDIO

#### 3.1 Introducción

En este Capítulo se muestra un caso típico de un conjunto mecánico con dos requerimientos funcionales. El caso se desarrolla utilizando el procedimiento propuesto de integración de la síntesis de tolerancias en el proceso de planificación asistida por computadoras expuesto en el Capítulo 2. La resolución del caso práctico pretende demostrar la validez del procedimiento y la secuencia o pasos necesarios para realizar el proceso descrito.

A continuación se muestra el plano de ensamble del caso de estudio desarrollado en un entorno de AUTOCAD (Figura 3.1).

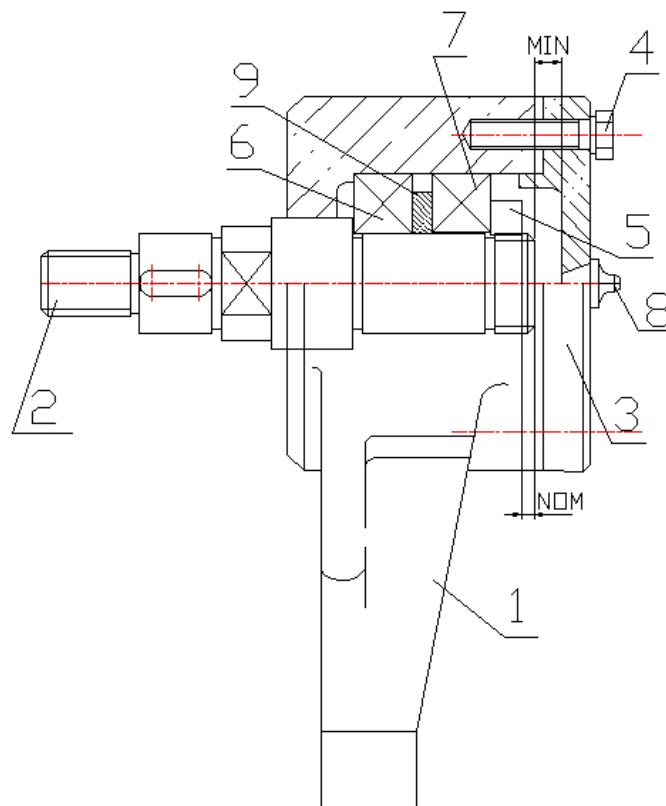


**Figura 3.1.** Plano de ensamble del caso de estudio.

#### 3.2 Identificación y caracterización de los requerimientos funcionales y las tolerancias

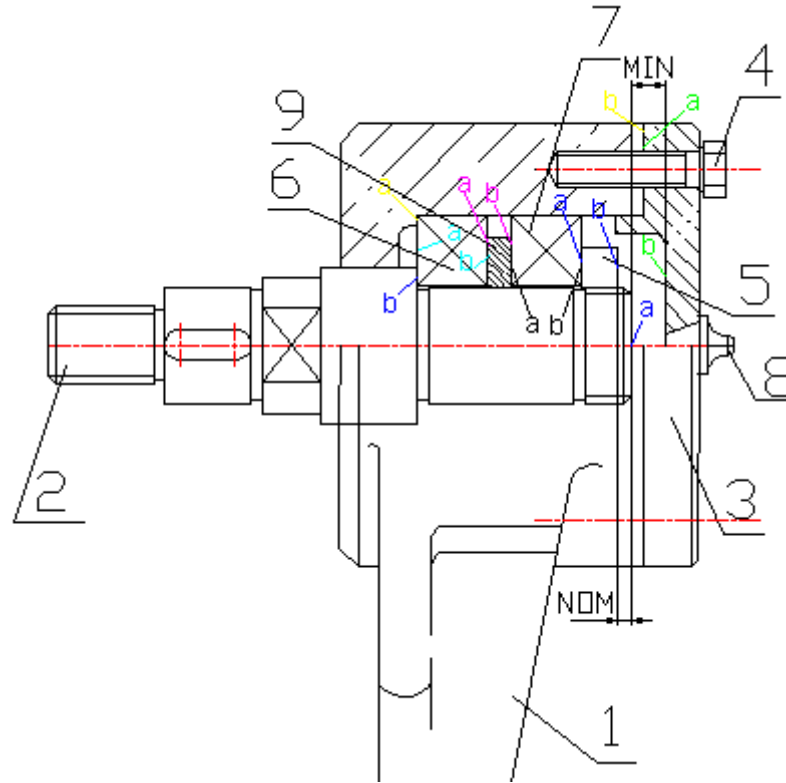
Para garantizar una correcta funcionalidad del conjunto mecánico representado en la Figura 3.2, se deben cumplir las siguientes condiciones funcionales: (A) La

pieza 3 debe encontrarse a una distancia mínima de la pieza 2 y (B) La pieza 6 debe encontrarse a una determinada distancia de la pieza 2.



**Figura 3.2.** Requerimientos funcionales del caso de estudio.

Luego de la identificación de los requerimientos funcionales existentes en el conjunto, según la estructura funcional propuesta en el Capítulo 2, se pasa a la numeración de cada una de las piezas con importancia funcional (Figura 3.3). En la Tabla 3.1 se muestra la correspondencia entre las condiciones necesarias para el funcionamiento del conjunto y los correspondientes requerimientos funcionales según la estructura funcional propuesta.



**Figura 3.3.** Identificación de los elementos y características funcionales.

**Tabla 3.1.** Requerimientos funcionales según la estructura funcional propuesta.

Identificador	Condición
A	Requerimiento funcional de Dimensión Mínima MÍN
B	Requerimiento funcional de Dimensión Nominal NOM

Para completar el proceso de identificación de los requerimientos, en cada pieza se identifican los requerimientos funcionales expresados en la estructura funcional propuesta (Tabla 3.2).

### 3.3 Modelación del ensamble (formación y evaluación de las cadenas dimensional) en el diseño conceptual

Una vez que se han caracterizado y representado los requerimientos funcionales según la estructura funcional propuesta, se desarrolla el método de las burbujas para el caso en cuestión. Este método integra a los requerimientos funcionales de forma coherente en un modelo de ensamble para entornos CAD.

**Tabla 3.2.** Requerimientos funcionales del conjunto mecánico de la Figura 3.1.

Pieza	Relaciones entre piezas	Requerimiento funcional
1	(Pieza1- Pieza3) (Pieza1- Pieza6)	CPR
2	(Pieza2)	ENB
	(Pieza2- Pieza3)	MÍN
	(Pieza2- Pieza5)	NOM
	(Pieza2- Pieza6)	CPR
3	(Pieza3- Pieza2)	MÍN
	(Pieza3- Pieza1)	CPR
5	(Pieza5- Pieza7)	CPR
	(Pieza5- Pieza2)	NOM
6	(Pieza6- Pieza2)	CPR
	(Pieza6- Pieza9)	CPR
7	(Pieza7- Pieza9)	CPR
	(Pieza7- Pieza5)	CPR
9	(Pieza9- Pieza7)	CPR
	(Pieza9- Pieza6)	CPR

La resolución de este caso se guiará por los siguientes pasos:

Paso 1. Identificación de los requerimientos funcionales a partir de las necesidades de los usuarios. En este caso, la identificación de los requerimientos se muestra en la Figura 3.2 y en las Tablas 3.1 y 3.2 se relacionan con más detalles.

Paso 2. Identificación de las piezas o elementos funcionales del conjunto mecánico. A partir de la identificación de los requerimientos funcionales en el ensamble, se identifican las piezas o elementos indispensables para el cumplimiento de los requerimientos. Se sugiere utilizar una nomenclatura numérica en orden ascendente, como muestra la Figura 3.2, donde a cada pieza con importancia desde el punto de vista funcional se le asocia un número 1, 2, 3, 5, 6, 7 y 9.

Paso 3. Identificación en cada una de las piezas numeradas y las características que garantizan su funcionalidad. En este paso se sugiere utilizar una nomenclatura por orden alfabético para cada pieza, como muestra la Figura 3.3. La nomenclatura utilizada para este caso es el siguiente: Pieza 1 —a y b—, Pieza 2

—a y b—, Pieza 3 —a y b—, Pieza 5 —a y b, Pieza 6 —a y b, Pieza 7 —a y b y Pieza 9 —a y b.

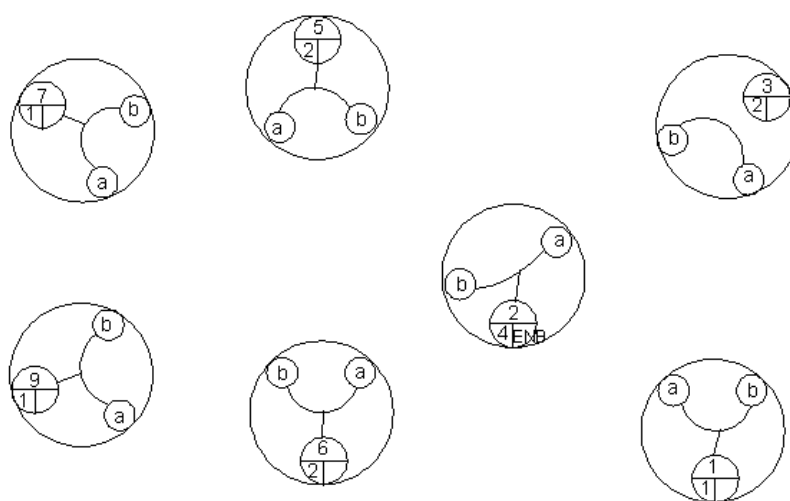
Paso 4. Modelar o construir el algoritmo gráfico para representar las interacciones y los requerimientos funcionales del ensamble mecánico. Este paso se basa en la etapa número cinco del procedimiento representado en la Figura 2.3.

Para este problema, se utilizará el método de la burbuja. Por tanto, se seguirán las recomendaciones, que sugieren:

a) A cada pieza con importancia funcional se le asocia un nodo principal (Figura 3.4).

b) A cada uno de los nodos, se le asocia un nodo de identificación, se define el número de requerimientos funcionales que intervienen en cada pieza (Figura 3.4).

El nodo de identificación contiene el número que se le asignó a cada pieza —paso 2—, el número de requerimientos funcionales en los que interviene cada nodo o pieza —según las Tablas 3.1 y 3.2— y los requerimientos funcionales de ensamble —según la Tabla 3.2.



**Figura 3.4.** Nodos principales en el conjunto mecánico —etapas a, b, c, d y e.

c) Se construye el nodo de relación y se asocia al nodo de identificación a través del vínculo nodal (Figura 3.4).

d) De acuerdo con la etapa número cuatro se construye en el nodo principal, los nodos de características con importancia funcional que tiene la pieza (Figura 3.3), en correspondencia con el Paso 3.

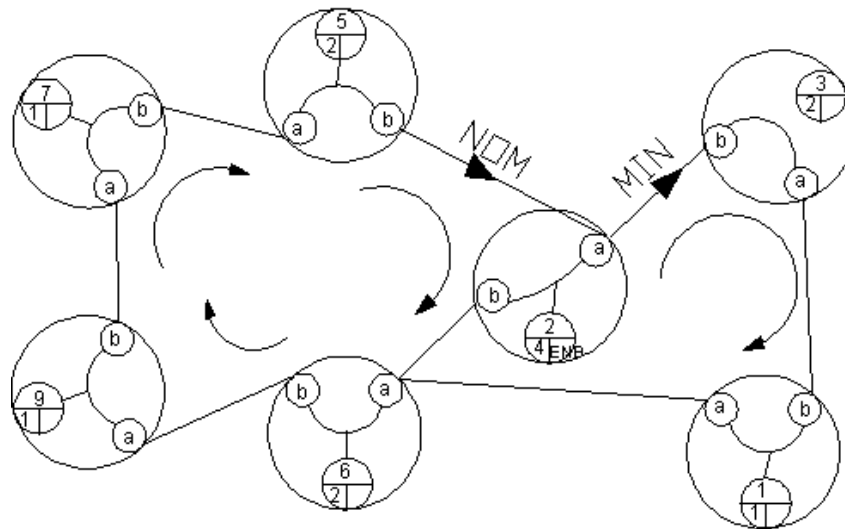
Cada nodo o pieza dispondrá de un conjunto de características que permiten el correcto desempeño o funcionalidad del conjunto mecánico, cada una de estas, se representará a través de un nodo de característica, e identificará a través de la nomenclatura definida en el paso 3, visto anteriormente. Por tanto, el nodo o la burbuja 1 tendrán dos nodos de característica —a, b.

e) Cada nodo de característica se une al nodo de relación a través del vínculo geométrico (Figura 3.4).

f) Las características entre los nodos principales que posean una relación de contacto permanente, se unen a través del vínculo de ensamble (Figura 3.5).

g) Cada requerimiento funcional se expresa entre las características de las piezas a través del vínculo funcional (Figura 3.5).

En este caso, se representan dos vínculos funcionales, uno para cada requerimiento funcional expresado en la Tabla 3.1.



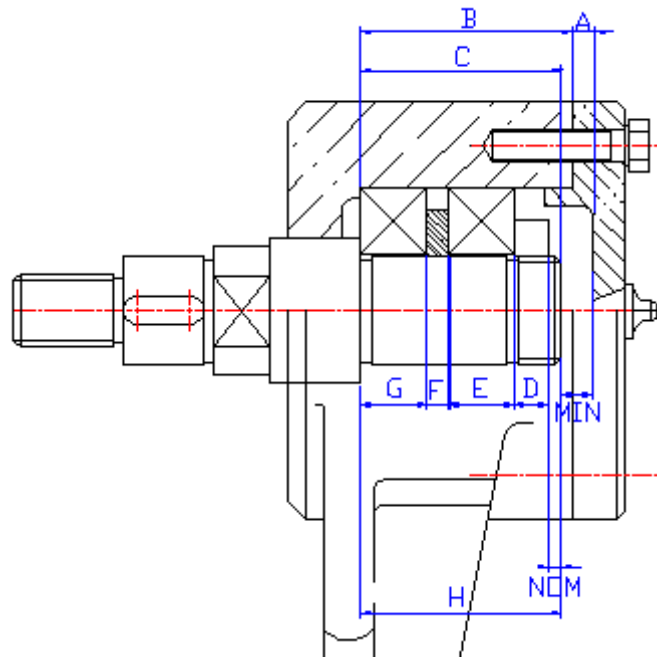
**Figura 3.5.** Etapas f y g; y Paso número 5 del método de las burbujas.

Como se observa en la Figura 3.4 —etapas f y g— el gráfico refleja de forma intuitiva cuáles pueden ser las rutas o cadenas dimensionales asociadas a este



caso. En todos los casos los gráficos son cíclicos, por lo que siempre tendrán un nodo o burbuja de entrada y un nodo o burbuja de salida. Sólo se seguirán aquellas rutas interiores al requerimiento funcional, para evitar la utilización excesiva de eslabones de la cadena dimensional para un determinado requerimiento.

Para el caso del requerimiento MÍN, la construcción de la cadena dimensional se iniciaría por la característica b del nodo principal 3. En el caso del requerimiento funcional NOM, se iniciaría por la característica a del nodo principal 2 (Figura 3.5), pues los vínculos funcionales de ambos requerimientos lo indican así. La cadena de cotas queda establecida de acuerdo a la ruta que se ha seguido. Las cadenas dimensionales se formularían de la siguiente forma:



**Figura 3.6.** Evaluación de la cadena dimensional.

Condición A: MÍN–3b – 3a – 1b – 1a – 6a – 2b – 2a – MÍN.

Condición B: NOM – 2a – 2b – 6a – 6b – 9a – 9b – 7a – 7b –5a – 5b– NOM.

La evaluación de la cadena dimensional se realiza en el gráfico de la Figura 3.5, según muestra la Figura 3.6. La inspección visual de la cadena dimensional

permitirá corregir las incorrecciones que puedan haberse cometido en el desarrollo del método.

### 3.4 Cálculo y corrección de las tolerancias dimensionales (Síntesis de tolerancias)

El diseñador provee las tolerancias de los eslabones basadas en sus criterios. Estas tolerancias se suman teniendo en cuenta la cadena dimensional comprobando la magnitud del requerimiento funcional. Luego se comparan con las guías o reglas de fabricación determinada para cada proceso (Tabla 3.3). Si no corresponden, las dimensiones se escalan mediante un factor de proporcionalidad constante. De esta manera las magnitudes relativas de las tolerancias de los eslabones se conservan.

Para la asignación correcta se hace necesario conocer las tolerancias determinadas por el diseñador en la dimensiones A, B, C y H son seleccionados de las reglas para las tolerancias en el proceso de torneado, representada en la Tabla 2.1. En la Tabla 3.3 se muestran los valores asignados.

#### Cálculo y corrección para el requerimiento funcional MÍN

Dimensión y tolerancia del requerimiento funcional: 8,40 +/- 0,09.

Cálculo de la cadena dimensional

$$MÍN = A + B - C$$

$$MÍN = 5,50 + 57,90 - 55,00 \text{ (mm)}$$

$$MÍN = 8,40 \text{ (mm)}$$

**Tabla 3.3.** Rango de tolerancia para la cadena dimensional MÍN.

	A	B	C
Dimensión (mm)	5,50	57,90	55,00
Tolerancias +/-			
Diseño (mm)	0,02	0,06	0,06
Fijas (mm)	-	-	-

Cálculo de la tolerancia del requerimiento funcional por el método de los peores casos.

$$T_{asm}=+T_A+T_B+T_C$$

$$T_{asm}=+0,02+0,06+0,06 \text{ (mm)}$$

$$T_{asm}=0,14 \text{ (mm)}$$

El valor obtenido de la tolerancia del ensamble es superior al exigido, por lo que se debe de resolver por el método de escala proporcional.

$$T_{asm}=0,09=P(+T_A+T_B+T_C)$$

$$T_{asm}=0,09=P(+0,02+0,06+0,06) \text{ (mm)}$$

$$P=0,09/(+0,02+0,06+0,06) \text{ (mm)}$$

$$P= 0,64 \text{ (mm)}$$

$$T_A=0,64*(0,02) \quad T_B=0,64*(0,06) \quad T_C=0,64*(0,06)$$

$$T_A=0,0130 \text{ (mm)} \quad T_B=0,0385 \text{ (mm)} \quad T_C=0,0385 \text{ (mm)}$$

Cada una de las tolerancias de diseño han sido reducidas para que reúnan los requisitos del ensamble. Estas serán las tolerancias reales que se utilizaran para fabricar las piezas.

### Cálculo y corrección para el requerimiento funcional NOM

Dimensión y tolerancia del requerimiento funcional: 3,70 +/- 0,06 (mm)

Cálculo de la cadena dimensional

$$MÁX = -D-E-F-G+H$$

$$MÁX = -9,40-18,00-5,90-18,00+55,00 \text{ (mm)}$$

$$MÁX = 3,70 \text{ (mm)}$$

**Tabla 3.4.** Rango de tolerancia para la cadena dimensional NOM.

	D	E	F	G	H
Dimensión (mm)	9,40	18,00	5,90	18,00	55,00
	Tolerancias +/-				
Diseño (mm)	-	-	-	-	0,060
Fijas (mm)	0,020	0,015	0,018	0,015	-

### **Cálculo de la tolerancia del requerimiento funcional por el método de los peores casos.**

$$T_{asm} = +T_D + T_E + T_F + T_G + T_H$$

$$T_{asm} = +T_{asm} = +0,020 + 0,015 + 0,018 + 0,015 + 0,060 \text{ (mm)}$$

$$T_{asm} = 0,128 \text{ (mm)}$$

El valor obtenido de la tolerancia del ensamble es superior al exigido, por lo que se debe de resolver por el método de escala proporcional.

$$T_{asm} = 0,06 = P(+T_D + T_E + T_F + T_G + T_H)$$

$$T_{asm} = 0,06 = 0,020 + 0,015 + 0,018 + 0,015 + P(0,060) \text{ (mm)}$$

$$P = (0,06 - (0,020 + 0,015 + 0,025 + 0,015)) / (0,06) \text{ (mm)}$$

$$P = 0,533 \text{ (mm)}$$

$$T_A = 0,533 * (0,06) \text{ (mm)}$$

$$T_A = 0,032 \text{ (mm)}$$

En este caso solo es posible reasignar las tolerancias a un eslabón (H) debido a que las restantes son fijas porque corresponden a piezas normalizadas, donde las tolerancias son asignadas por el fabricante.

Teniendo las tolerancias corregidas, es posible seguir al siguiente paso tomando como referencia lo realizado anteriormente.

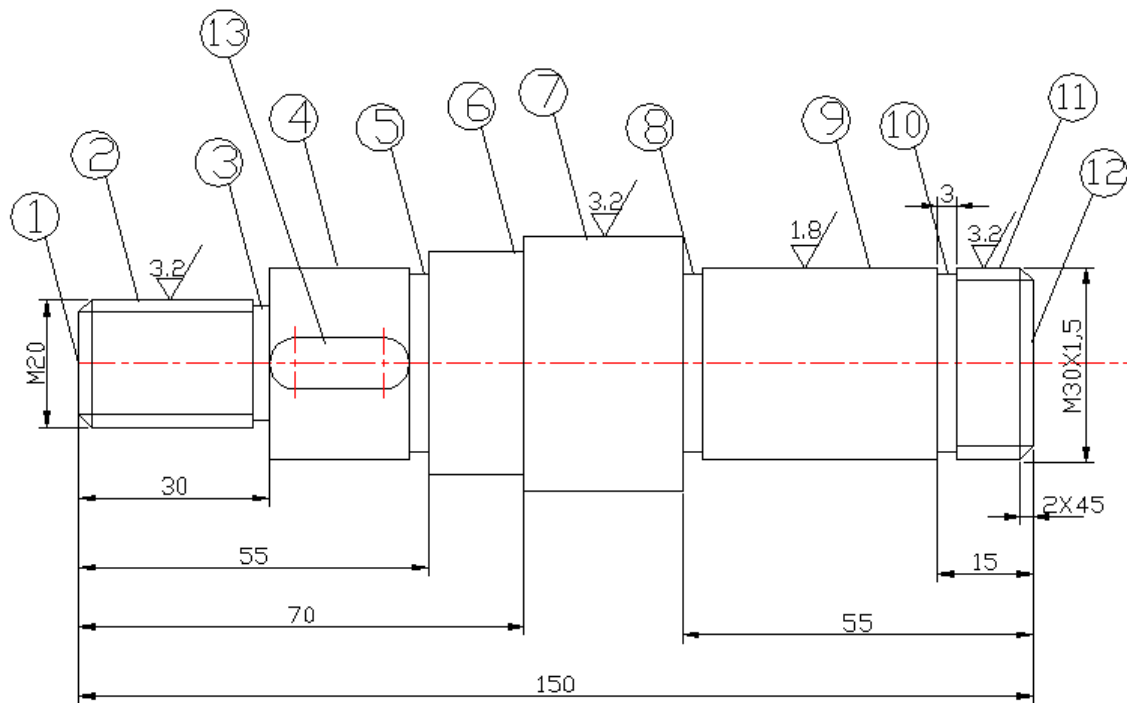
A partir de este paso se efectúa el procedimiento siguiendo la estructura del algoritmo mostrado en la Figura 2.11.

### **3.5 Selección de las piezas a fabricar**

La tarea de elaboración de tecnologías de maquinado constituye un elemento del sistema de diseño y fabricación de piezas. De tal forma, la búsqueda de los objetos (piezas) consiste en primer lugar, en la definición del conjunto de piezas para los que se diseña el sistema. En este caso se efectuará para piezas rotacionales por su importancia funcional en este tipo de ensambles (pieza 2 del ensamble Figura 3.1).

### 3.6 Determinación de los procesos de mecanizado y métodos de elaboración

Es necesario determinar las superficies que se van a mecanizar, así como su tipo, la rugosidad superficial y las tolerancias (Figura 3.7) y los métodos de elaboración por superficies (Tabla 3.5).



**Figura 3.7.** Superficies a mecanizar del caso de estudio.

**Tabla 3.5.** Métodos de elaboración para el mecanizado del árbol.

No. Superficie	Grado de Exactitud	Rugosidad superficial-Ra	Tipo de Superficie	Método de Elaboración
1	IT10	6.3	Plana	Fresado
2	IT8	3.2	Cilíndrica Exterior	Torneado de desbaste Torneado de semiacabado Roscado
3	IT11	6.3	Ranuras	Ranurado
4	IT7	3.2	Cilíndrica Exterior	Torneado de desbaste Torneado de semiacabado
5	IT11	6.3	Ranuras	Ranurado
6	IT7	3.2	Cilíndrica Exterior	Torneado de desbaste Torneado de semiacabado
7	IT6	6.3	Cilíndrica Exterior	Torneado de desbaste Torneado de semiacabado Torneado de acabado
8	IT11	6.3	Ranuras	Ranurado
9	IT6	1.8	Agujeros	Torneado de desbaste Torneado de semiacabado Rectificado
10	IT11	6.3	Ranuras	Ranurado
11	IT8	3.2	Cilíndrica Exterior	Torneado Desbaste Torneado Semiacabado Roscado
12	IT10	6.3	Plana	Fresado
13	IT10	6.3	Plana	Fresado

Las máquinas herramienta utilizadas en cada operación se representan en la Tabla 3.6.

**Tabla 3.6.** Máquinas-herramienta para el mecanizado del árbol.

No. Superficie	Grado de Exactitud	Rugosidad superficial-Ra	Tipo de Superficie	Máquina -herramienta
1	IT10	6.3	Plana	Fresadora - centradora MP71MTB-K
2	IT8	3.2	Cilíndrica Exterior	Torno de cilindrar 16K20
3	IT11	6.3	Ranuras	Torno de cilindrar 16K20
4	IT7	3.2	Cilíndrica Exterior	Torno de cilindrar 16K20
5	IT11	6.3	Ranuras	Torno de cilindrar 16K20
6	IT7	3.2	Cilíndrica Exterior	Torno de cilindrar 16K20
7	IT6	6.3	Cilíndrica Exterior	Torno de cilindrar 16K20
8	IT11	6.3	Ranuras	Torno de cilindrar 16K20
9	IT6	1.8	Cilíndrica Exterior	Torno de cilindrar 16K20 / Rectificadora 3M174
10	IT11	6.3	Ranuras	Torno de cilindrar 16K20
11	IT8	3.2	Cilíndrica Exterior	Torno de cilindrar 16K20
12	IT10	6.3	Plana	Fresadora Universal FU
13	IT10	6.3	Plana	Fresadora Universal FU

Descripción del proceso de maquinado atendiendo a las operaciones, colocaciones, posición y pasos tecnológicos necesarios para la elaboración de la pieza.

Operaciones.

I. Fresado – Centrado (fresar extremos, taladrar orificios de centro).

Colocación.

A. Colocación de la pieza en bruto en la maquina FRESADORA-CENTRADORA (Mordaza).

Posición.

1. Para refrentar extremos y centrar la pieza.

Paso tecnológico(s).

- 56



f. Cilindrado exterior de desbaste y semiacabado [sup.11], garantizando, diámetro requerido y sobremedida para el acabado y roscado.

g. Ranurado de la [sup.10], garantizando el diámetro requerido.

Colocación(s).

**C.** Colocación de la pieza entre punto y punto de la MH TORNO.

Posición.

1. Para cilindrado de la superficie 7 y 8.

Paso tecnológico.

a. Cilindrado exterior de acabado [sup.7, 9 y 11], garantizando, diámetro requerido y sobremedida para el rectificado de las [sup.8] y para el roscado de la [sup.11].

b. Ranurado de la [sup.10], garantizando el diámetro requerido.

c. Roscado de la [sup.11], garantizando M30X1,5.

### **III. Fresado (elaboración del Chavetero).**

Colocación.

**A.** Colocación de la pieza en la MH FRESADORA (Prisma).

Posición.

1. Para el chavetero superficie 13.

Paso tecnológico.

a. Fresado plano del chaveteo [sup.13].

### **IV. Tratamiento térmico.**

### **V. Rectificado**

Colocación.

**A.** Colocación de la pieza en la MH RECTIFICADORA (Centro y perro de arrastre).

Posición.

1. Para rectificado de la superficies 9.

Paso tecnológico.

a. Rectificado de las [sup.9], garantizando rugosidad superficial requerida (Ra. 1.8).

## **3.7 Determinación del tipo de colocación**

Se toman en consideración conceptos como: en el maquinado de desbaste la colocación entre plato y punto es recomendable debido a la rigidez, la de punto y

punto garantiza la concentricidad entre los escalones. Además los errores de forma y posición (Tabla 3.7) deben de fabricarse en la misma colocación. En la proyección del caso de estudio se utilizan las colocaciones representadas en la Tabla 3.8.

**Tabla 3.7.** Errores de forma y posición.

Orientación	Paralelismo	//
	Perpendicularidad	⊥
	Angularidad	∠
Situación	Posición	⊕
	Concentricidad/Coaxialidad	⊙
	Simetría	≡

**Tabla 3.8.** Colocaciones utilizadas.

Operación	Colocación
Fresado-centrado	Mordaza
Torneado	Plato Plato y punto Punto y punto
Fresado	Prisma Mordaza
Rectificado	Centro y perro de arrastre

### 3.8 Elección de la herramienta de corte y los regímenes de corte

Las características de la pieza a fabricar, el material, su forma o diseño, precisión y acabado superficial inciden en la selección del material cortante de la herramienta, su forma y geometría; con estos elementos se parte para seleccionar el régimen de corte. Para cada operación se selecciona la herramienta de corte siguiendo el siguiente procedimiento:

- Identificar la operación
- Definir el sistema de portaherramientas.
- Definir el sistema de sujeción.
- Seleccionar la plaquita.

- Forma, tamaño.
- Calidad.

— Datos de corte

Lo antes expuesto se resume en las tablas que se observan a continuación para cada de la operaciones desde la Tabla 3.9 hasta la Tabla 3.24.

**Tabla 3.9.** Paso tecnológico (a), colocación(A) de la operación de fresado centrado

Método de elaboración	Sist. H	Sist. S	Diámetro (mm) y paso	Geom.	Calid.	Régimen C.
Fresada plano	Coromill 245	Mango cilíndrico	Dc=32 Normal	iC=13,4 S=3,97 bs=2,1 la=10 re=1,5	GC 530.	P= 0,1 mm A= 0,05 mm/r V=285 m/min

**Tabla 3.10.** Paso tecnológico (a), colocación (A) de la operación de torneado

Método de elaboración	Sist. H	Sist. S	Forma	Tamaño	Calid.	Régimen de corte
Cilindrado de desbaste.	Coro Turn RC	Diseño de sujeción rígida.	Cuadrada de 90°	25 mm	GC 5015	P= 5 mm A= 0,2 mm/r V=190 m/min
Cilindrado de semi-acabado.	Coro Turn RC	Diseño de sujeción rígida.	Rómbica de 55°	15 mm	GC 1525	P= 0,5 mm A= 0,1 mm/r V=235 m/min

**Tabla 3.11.** Paso tecnológico (b), colocación (A) de la operación de torneado

Método de elaboración	Sist. H	Sist. S	Forma	Tamaño	Calid.	Régimen C.
Ranurado	Coro Turn RC	Diseño de sujeción por tornillo	Redonda CF	35 mm	GC 3115	P= 5 mm A= 0,5 mm/r V=105 m/min

**Tabla 3.12.** Paso tecnológico (c), colocación (A) de la operación de torneado

Método de elaboración	Sist. H	Sist. S	Forma	Tama.	Calid.	Régimen C.
Roscado	166.4F G	Diseño de sujeción por tornillo.	Cuadrada de 90°	16mm.	GC 4125	P= 0,94(4) mm A= 0,1 mm/r V=90 m/min

**Tabla 3.13.** Paso tecnológico (a), colocación (B) de la operación de torneado

Método de elaboración	Sist. H	Sist. S	Forma	Tama.	Calid.	Régimen C.
Cilindrado de desbaste.	Coro Turn RC	Diseño de sujeción rígida.	Cuadrada de 90°	25 mm	GC 5015	P= 5 mm A= 0,2 mm/r V=190 m/min
Cilindrado de semi-acabado.	Coro Turn RC	Diseño de sujeción rígida.	Rómbica de 55°	15 mm	GC 1525	P= 0,5 mm A= 0,1 mm/r V=235 m/min

**Tabla 3.14.** Paso tecnológico (b), colocación (B) de la operación de torneado

Método de elaboración	Sist. H	Sist. S	Forma	Tama.	Calid.	Régimen C.
Ranurado	Coro Turn RC	Diseño de sujeción por tornillo	Redonda CF	35 mm	GC 3115	P= 5 mm A= 0,5 mm/r V=105 m/min

**Tabla 3.15.** Paso tecnológico (c), colocación (B) de la operación de torneado

Método de elaboración	Sist. H	Sist. S	Forma	Tama.	Calid.	Régimen C.
Cilindrado de desbaste.	T-MAX P	Diseño de palanca	Redonda	32mm	GC 4015	P= 4 mm A= 0,8 mm/r V=150 m/min
Cilindrado de semi-acabado	T-MAX P	Diseño de palanca	Triangula r	27mm	GC 4015	P= 0,4 mm A= 0,4 mm/r V=200 m/min

**Tabla 3.16.** Paso tecnológico (d), colocación (B) de la operación de torneado

Método de elaboración	Sist. H	Sist. S	Forma	Tama	Calid.	Régimen C.
Cilindrado de desbaste.	Coro Turn RC	Diseño de sujeción rígida.	Cuadrada de 90°	38 mm	GC 5015	P= 5 mm A= 0,2 mm/r V=190 m/min
Cilindrado de semi-acabado	T-MAX P	Diseño de palanca	Rómbica 80°	27mm	GC 4015	P= 0,5 mm A= 0,1 mm/r V=165 m/min

**Tabla 3.17.** Paso tecnológico (e), colocación (B) de la operación de torneado

Método de elaboración	Sist. H	Sist. S	Forma	Tama.	Calid	Régimen de corte
Ranurado	Coro Cut	Diseño de sujeción por tornillo	Redonda CF	35 mm	GC 3115	P= 5 mm A= 0,2 mm/r V=90 m/min

**Tabla 3.18.** Paso tecnológico (f), colocación (B) de la operación de torneado

Método de elaboración	Sist. H	Sist. S	Forma	Tama.	Calid.	Régimen de corte
Cilindrado de desbaste.	Coro Turn RC	Diseño de sujeción rígida.	Cuadrada de 90°	25 mm	GC 5015	P= 5 mm A= 0,2 mm/r V=190 m/min
Cilindrado de semi-acabado	T-MAX P	Diseño de palanca	Rómbica 55°	15mm	GC 1525	P= 0,5 mm A= 0,1 mm/r V=165 m/min

**Tabla 3.19.** Paso tecnológico (g), colocación (B) de la operación de torneado

Método de elaboración	Sist. H	Sist. S	Forma	Tama.	Calid.	Régimen de corte
Ranurado	Coro Cut	Diseño de sujeción por tornillo	Redonda CF	32 mm	GC 3115	P= 5 mm A= 0,5 mm/r V=105 m/min

**Tabla 3.20.** Paso tecnológico (a), colocación (C) de la operación de torneado

Método de elaboración	Sist. H	Sist. S	Forma	Tama.	Calid.	Régimen C.
Cilindrado de Acadado	Coro Turn RC	Diseño de sujeción rígida.	Rómbica 35 <sup>0</sup>	11 mm	GC 5015	P= 0,1 mm A= 0,05 mm/r V=285 m/min

**Tabla 3.21.** Paso tecnológico (b), colocación (C) de la operación de torneado

Método d elaboración	Sist. H	Sist. S	Forma	Tama.	Calid.	Régimen C.
Ranurado	Coro Cut	Diseño de sujeción por tornillo	Redonda CF	32 mm	GC 3115	P= 5 mm A= 0,5 mm/r V=105 m/min

**Tabla 3.22.** Paso tecnológico (c), colocación (C) de la operación de torneado

Método de elaboración	Sist. H	Sist. S	Forma	Tama.	Calid.	Régimen C.
Roscado	166.4FG	Diseño de sujeción por tornillo.	Cuadrada de 90 <sup>0</sup>	16mm	GC 4125	P= 0,94(4) mm A= 0,1 mm/r V=90 m/min

**Tabla 3.23.** Paso tecnológico (a), colocación (A) de la operación de fresado

Método de elaboración	Sist. H	Sist. S	Diámetro (mm) y paso	Geom.	Calid.	Régimen C.
Fresado perfiles	Coromill 390	Mango cilíndrico	Dc=8 Normal	iW=6,8 S=3,59 bs=0,9 la=11 re=0,4	GC 530	P= 4 mm A= 0,12 mm/diente V=275 m/min

**Tabla 3.24.** Paso tecnológico (a), colocación (A) de la operación de rectificado

Método de elaboración	Sist. H	Sist. S	Forma	Tama.	Calid.	Régimen C
Rectificado Cilíndrico	Coro Rec RC	Diseño de sujeción rígida.	Rómbica 35 <sup>0</sup>	11 mm	GC 5015	P= 0,1 mm A= 0,05 mm/r V=285 m/min

La ruta tecnológica, que es el documento final que concluye este caso de estudio, se representa en la tabla 3.25.

**Tabla 3.25.** Ruta tecnológica del caso de estudio

<b>CARTA DE RUTA</b>		<b>Árbol</b>	
MATERIAL ACERO 45		MASA (Kg) 4.485	PIEZA EN BRUTO LAMINADA MASA (Kg) 7,945
<b>Ope.</b>	<b>Denominación</b>	<b>Equipo</b>	<b>Dispositivos</b>
005	Fresado – Centrado, fresar extremos, taladrar orificio centro	Fresadora - centradora MP71MTB-K	Mordazas
010	Torneado – Cilindrar-Ranurar	Torno de cilindrar 16K20	Plato con boquilla Plato y punto Punto y punto.
020	Torneado –Roscado	Torno de cilindrar y roscar 16K20	Plato con boquilla
025	Fresado	Fresadora Universal FU-251	Mordazas y prisma
030	Tratamiento Térmico		
035	Rectificado	Rectificadora 3M174	Centros y perro de arrastre
040	Control		

### 3.9 Conclusiones

- Se validó la hipótesis propuesta mediante la aplicación del procedimiento descrito a través de la solución de un caso de estudio.

## **Conclusiones generales**

- La revisión bibliográfica demostró la necesidad de realizar estudios e investigaciones relacionadas con la integración de los diferentes enfoques de la síntesis de tolerancias con los sistemas de apoyo a la planificación de la producción asistida por computadoras (CAPP).
- Al garantizar la integración de la síntesis conceptual de tolerancias en los sistemas CAPP los diseñadores serán capaces de predecir cuantitativamente los efectos de las tolerancias en el rendimiento y posibilitará la reasignación de las mismas.
- Se desarrolló un método que integra la síntesis conceptual de tolerancias con los sistemas CAPP para la generación de rutas tecnológicas.
- Se validó la hipótesis propuesta mediante la aplicación del procedimiento descrito a través de la solución de un caso de estudio.



## **Recomendaciones**

- Desarrollar una herramienta informática que contenga todos los pasos previstos en el procedimiento desarrollado.
- Desarrollar investigaciones relacionadas con la estimación de costos a partir de la información que genera el procedimiento.

## **Referencias bibliográficas**

- AHMAD, N., 2001. "Optimization of process planning parameters for rotational components by genetic algorithms". 4th International Conference on Mechanical Engineering, December 26-28, Dhaka, Bangla-desh/pp.VII 227-233.
- AMAITIK, S.; KILIÇ, E., 2004. "Step feature-based intelligent process planning system for prismatic parts". The Eleventh International Conference on Machine Design and Production 13 - 15 October, Antalya, Turkey.
- ANSELMETTI, M.B., 1995. "Application des Exigences au Minimum et au Maximum de Matière au Tolérancement Fonctionnel d'un Mécanisme", Séminaire Tolérancement et Chaînes de Cotes, ENS Cachan, Francia, Febrero.
- ANSELMETTI, M.B., 1995. "Méthode de Tolérancement pour la Fonction and Manufacturing", Actes de Conférences ILCE 95. Integrated Logistics & Concurrent Engineering, Paris, Enero-Febrero.
- BAHARIN, S. et al., 1993. "Intelligent Computer Aided Tolerance Studies". Computer Aided Tolerance. CRC Press. p. 777-788.
- BALLU, A.; MATHIEU, L., 1995. "Univocal Expression of Functional and Geometrical Tolerances for Design, Manufacturing and Inspection", Proceedings of the 4<sup>th</sup> CIRP Seminar on Computer Aided Manufacturing, Tokyo, Abril, p. 31-52.
- BENGOA, G., 1998. "Introducción a la preparación del trabajo asistido por ordenador". CYTED. Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo. RIBAMEC. Red Iberoamericana de Automatización de los Procesos de Mecanizado. Santa Cruz de la Sierra, Bolivia.
- BOUAZIZ, Z. y F. MASMOUDI, 2006. "Manufacturing simulation: Computer Aided Tolerancing for Process Planning". International Journal of Simulation and Modeling. Francia Vol. 5. Núm. 1. p. 5-15.
- BOURDET, P., 1982. "Choix et Optimization des Cotes de Réglage", Mécanique Materiaux Electricité, Francia Núm. 388, Abril, p.151-156.
- BROWN, C.M., 1982. "PADL-2: A Technical Summary", IEEE Computers Graphics and Applications, , Estados Unidos, Vol. 2, Núm. 2, 29-68.
- CECIL J., 1997. IE 590 INTEGRATED MANUFACTURING SYSTEMS. Estados Unidos.
- CENTRE D'ETUDES ET DE RÉNOVATION PÉDAGOGIQUE DE L'ENSEIGNEMENT TECHNIQUE, 1999. "Exploitation du Concept G.P.S. et de la Normalisation pour la Spécification Géométrique des

- Produits", Ministère de l'Éducation Nationale de la Recherche et de la Technologie, Francia, 80 pág.
- CHANG, T.; WYSK, R.; WANG, H., 1998. "Computer-Aided Manufacturing" 2nd Edition, Prentice Hall Int. Series in Industrial & Systems Engineering. Estados Unidos,
- CHASE K. W., 1988 "Design Issues in Mechanical Tolerance Analysis". ADCATS Report No. 87-5 Reprinted from Manufacturing Review, ASME, Estados Unidos, vol 1, no 1, Mar. 1988, pp. 50-59.
- CHASE, K.W. et al., 1997. "Tolerance Analysis of 2-D and 3-D Mechanical Assemblies with Small Kinematics Adjustments". "Advanced Tolerancing Techniques". John Wiley & Sons. Estados Unidos. p. 103-138.
- CHASE, K. W. et al., 1990. "Least Cost Tolerance Allocation for Mechanical Assemblies with Automated Process Selection", Manufacturing Review, ASME, Estados Unidos, Vol. 3, Núm. 1, Marzo, 49-59.
- CHASE, K.W., 1999. "Tolerance Allocation Methods for Designers", ADCATS Report No. 99-6, Mechanical Engineering Department, Brigham Young University, 34 pág.
- CIURANA, J., 1997. "Contribució a les Bases Conceptuals per la Implantació de l'Acotació Funcional Unidireccional en Sistemes CAD". [Tesis Doctoral]. Departamento de Ingeniería Mecánica. ETSEIB, Universidad Politécnica de Cataluña. España.
- CIURANA, J.; RIBA, C., 2000. "Desarrollo de un Algoritmo para la Adaptación de la Acotación Funcional Unidireccional en Sistemas CAD", Revista Iberoamericana de Ingeniería Mecánica, Vol. 4, Núm. 1, Marzo, 41-52.
- CIURANA, J.; RIBA, C., 2000. G.-Romeu de Luna, M. L., 2000. "Sistema Asistido para la Formación de las Cadenas de la Síntesis de Cotas Unidireccional", Anales del XIV Congreso Nacional de Ingeniería Mecánica, Leganés, Diciembre 13-15, Madrid, 1839-1844.
- CLÉMENT, A.; RIVIÈRE, A.; SERRÉ, P., 2000. "Définition Formelle du Tolérancement en CAO et en Métrologie", Proceedings of the 3<sup>rd</sup> International Conference on Integrated Design and Manufacturing in Mechanical Engineering, Montreal, Canada, Mayo.
- CLÉMENT, A.; RIVIÈRE, A.; TEMMERMAN, M., 1994. "Cotation Tridimensionnelle des Systèmes Mécaniques", PYC Edition, Francia.
- CROW, K., 2000. "COMPUTER- AIDED PROCESS PLANNING, DRM Associates" Estados Unidos,.
- DONNARUMMA, A. y G. GIORLEO, 2002. "A Contribution to the Study of Tolerancing Technology". International Journal of Advanced Manufacturing Technology. Vol. 19. p. 291-294.

- EMCH, G. y A. PARKINSON, 1994. "Robust Optimal Design for Worst-Case Tolerances". *Journal of Mechanical Design*. Transactions of the ASME. Vol. 116. p. 1019-1025.
- EVANS, D., 1975. Statistical Tolerancing: The State of the Art. Part II. Methods for Estimating Moments. *Journal of Quality Technology*. Vol. 7. Núm. 1. p. 1-12.
- FALCÓ S., O., 2004. "Desarrollo de un sistema de simulación virtual de maquinado sobre entornos WEB". [Tesis de maestría]. Universidad de Holguín.
- GAO, J. et al., 1998. "Global Coordinate Method for Determining Sensitivity in Assembly Tolerance Analysis". Technical report. Mechanical Engineering Department. Brigham Young University.
- GERTH, R.J. y T. PFEIFER, 2000. "Minimum cost tolerancing under uncertain cost estimates". *IIE Transactions*. Vol. 32. p. 493-503.
- GONZÁLEZ, F.; GUTIÉRREZ, S.; MESEGUER, A.; 2004. "Propuesta General y Flexible para Planificación de Procesos Asistida por Computador". *Información Tecnológica*-Vol. 15 N°4-2004, págs.: 3-8 Chile.
- HARIK, R., DERIGENT, W., RIS, G., 2008. "Computer Aided Process Planning in Aircraft Manufacturing". *Computer-Aided Design and Application* <http://www.cadanda.com>.
- HASSAN, A.; SIADAT, A.; DANTAN, J.; MARTIN, P., 2009. "A quality/cost-based improvement approach for conceptual process planning". *International Journal of Management Science and Engineering Management* Vol. 4 No. 3, pp. 188-197. England, UK.
- HENG, W., et. al, 2005. "Simulated toleranced CAD geometrical model and automatic generation of 3D dimension chains". *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. Diciembre.
- HILLYARD, R.D.; BRAID, I.C., 1978. "Analysis of Dimensions and Tolerances in Computer Aided Mechanical Design", *Computer Aided Design*, Mayo, Estados Unidos, 161-166.
- ISMAIL, N., 2008. "Manufacturing process planning optimisation in reconfigurable multiple parts flow lines". *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering* Vol. 31.
- ISO, 1981. International Standard. Technical Drawing. 5459: Geometrical Tolerancing. Datums and Datums-Systems for Geometrical Tolerances.
- ISO, 1985. International Standard. Technical Drawing. 129: Technical Drawings. Dimensioning. General Principles, Definitions, Methods of Execution and Special Indications.
- ISO, 1987. International Standard. Technical Drawing. 406: Technical Drawings. Tolerancing of Linear and Angular Dimensions.

- ISO, 1987. International Standard. Technical Drawing. 5458: Geometrical Tolerancing. Positional Tolerancing.
- ISO/TR, 1985. International Standard. Technical Drawing. Geometrical Tolerancing of Form, Orientation, Location and Run-Out. Verification Principles and Methods. Guidelines.
- JOHANNESSON, H. y R. SÖDERBERG, 2000. "Structure and Matrix Models for Tolerance Analysis from Configuration to Detail Design". Research in Engineering Design. Núm. 12. p. 112-125.
- JUSTER, N.P., 1992. "Modelling and Representation of Dimensions and Tolerances: A Survey", Computer Aided Design, Vol. 24, Núm. 1, 3-17.
- KORKUT, İ., 2003. "Process planning using a cad/cam system". International Conference Power Transmissions 03.
- KULDERKNUP, E., et al., 2004. "Modified calculation method of tolerance of dimensional chain dependent link". 4TH International DAAAM Symposium "Industrial Engineering-Innovation as Competitive Edge SME". Estonia.
- KULKARNI, V.S.; PANDE, S.S., 1996. "Representation of Feature Relationship Tolerances in Solid Models", International Journal of Production Research, Vol. 34, India. Núm. 7, 1975-1994.
- LAFOND, P.; LAPERRIÈRE, L., 1999. "Jacobian-based Modeling of Dispersions Affecting Pre-Defined Functional Requirements of Mechanical Assemblies", Proceedings of the 1999 IEEE. International Symposium on Assembly and Task Planning, Porto, Portugal, Julio, 20-25.
- LEONDES, C., 2001. "Computer Aided Design, Engineering, and Manufacturing – System", Techniques and Applications, Estados Unidos, Vol. II, CRC Press.
- LIN, V.C.; GOSSARD, D.C., 1981. "Variational Geometry in Computer Aided Design", Computer Graphics, Vol. 15, Núm. 3, 171-177.
- LIU, Z.; WANG, L., 2006. "Sequencing of interacting prismatic machining features for process planning". Computer in Industry [www.elsevier.com/locate/compind](http://www.elsevier.com/locate/compind).
- MARGUET, B., MATHIEU, L., 1997. "Tolerancing Problems for Aircraft Industries", Computer Aided Tolerancing, 5<sup>th</sup> CIRP Seminar, Abril, Toronto, Canadá.
- MARTINO, P., 1992. "Simplifications of Feature Based Models for Tolerance Analysis", ASME, New York, Estados Unidos, Vol. 1, 329-341.
- MERKLEY, K.G., 1998. "Tolerance Analysis of Compliant Assemblies". [Tesis Doctoral]. Brigham Young University.
- MIKÓ, B.; SZEGH, I.; KUTROVÁČZ, L., 1999. "Preliminary planning of part manufacturing process". Periodica polytechnica ser. mech. eng. vol. 43, no. 2, pp. 97–106.

- MONTECINOS, J.; MACHACUAY, J.; FANTOZZI, C.; GRANCHI, M.; 2007. "Planificación del proceso de mecanizado de piezas a partir del modelado solido basado en componentes". 8º congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica Cusco, 23 al 25 de octubre.
- NARAHARI, Y. et al., 1998. "Design of Tolerance of Electro-Mechanical Assemblies: An Integrated Approach", Report NISTIR-6223, National Institute of Standards and Technology, Maryland, Estados Unidos.
- NEDERBRAGT W., 2000. "The NIST Design/Process Planning Integration Project".
- NIGAN, S.D. y J. TURNER, 1995. "Review of Statistical Approaches to Tolerance Analysis". Computer Aided Design. Vol. 27. Núm. 1. p. 6-15.
- PARKINSON, D.B., 1985. "Assessment and Optimization of Dimensional Tolerances". Computer Aided Design. Vol. 17. Núm. 4. Mayo. Estados Unidos, p. 191-199.
- PÉREZ R., R., 2004. "Caracterización y Representación de los Requerimientos Funcionales y las Tolerancias en el Diseño Conceptual: Aportaciones para su Implantación en los Sistemas CAD". [Tesis doctoral]. Universitat Politècnica de Catalunya. Barcelona. España.
- PÉREZ R., R., *et al.*, 2005. "Síntesis Dimensional de Tolerancias en el Proceso de Diseño". II Conferencia Científica Internacional de la Universidad de Holguín. Simposio de Ingeniería. Octubre de 2005. CD-ROM. ISBN 59-16-0361-4.
- PÉREZ R., R., *et al.*, 2006. "The characterization and specification of functional requirements and geometrical tolerances in design". Journal of Engineering Design. Inglaterra. Vol 17, No 4, pp. 311 – 324.
- PÉREZ R., R., *et al.*, 2008. "A Framework for Tolerance Analysis in Collaborative Engineering Mechanical Design". Lecture Notes in Computer Science. Volumen 5220. pp. 58-65.
- PÉREZ R., R., *et al.*, 2011. "Concurrent Conceptual Evaluation of Tolerances' Synthesis in Mechanical Design". Concurrent Engineering. USA (En evaluación).
- PORTMAN, V., 1995. "Modelling Spatial Dimensional Chains for CAD/CAM Applications". Proceedings of the 4<sup>th</sup> CIRP Seminar on Computer Aided Manufacturig. Tokyo. Abril. p. 71-84.
- RAMANI, B.; CHERAGHI, S. H.; TWOMEY, J. M., 1998. "CAD-Based Integrated Tolerancing System", International Journal of Production Research, Vol. 36, Núm. 10, 2891-2910.
- RAMOS, B., et al., 2002. "Análisis de las tolerancias de ensamblaje asistidas por ordenador en el diseño (CAT)". XIV Congreso Internacional de Ingeniería Gráfica. Santander. España.

- REQUICHA, A.A.G.; CHAN, S. C., 1986. "Representation of Geometric Features, Tolerances and Attributes in Solid Modelling", IEEE Journal of Robotics and Automations, Vol. RA-2, Estados Unidos, Núm. 3, 156-166.
- ROY, U.; LIU, C.R.; WOO, T.C., 1991. "Review of Dimensioning and Tolerancing: Representation and Processing", Computer Aided Design, Vol. 23, Núm. 7, 466-483.
- ROYO, E. J., 2003. "Utilajes en los Sistemas de Fabricación Flexible". Ingeniería de Diseño y Fabricación. Conferencia.
- SADAI AH M.; YADAV R.; MOHANRAM V.; RADHAKRISHNAN P., 2002. "A Generative Computer-Aided Process Planning System for Prismatic Components", Int J Adv Manuf Technol 19:805–811.
- SANDVIK COROMANT, 2002 "Productos para el mecanizado del metal, herramientas para torneado". Suecia.
- SANDVIK COROMANT, 2004 "Productos para el mecanizado del metal, herramientas rotativas". Suecia.
- SCHNEIDER, F., 1994. "Aspect Géométrique de la Définition Tridimensionnelle des Mécanismes", Tesis Doctoral, École Normale Supérieure de Cachan, Francia.
- SERRANO, J., 1993. "De la Función a la Fabricación. Aplicación Práctica: Programa informático de Ayuda a la Acotación de Mecanismos. Modelización Unidireccional", P.F.C., ETSII de Valencia, Universidad Politécnica de Valencia.
- SERRANO, J.; ROMERO, F.; SEGUI, J.; ZAMANILLO, J. D., 1994. "Obtención de una Acotación de Fabricación Óptima a Partir de las Condiciones Funcionales. Caso Unidireccional", Anales del XI Congreso de Ingeniería Mecánica, Vol. 3, 83-91.
- SÖDERBERG, R. y L. LINDKVIST, 2000. "Robust Design & Tolerancing from Concept to Process Selection". 33th CIRP-International Seminar on Manufacturing Systems. Stockholm. Suecia. Junio.
- SÖDERBERG, R.; JOHANNESSON, H., 1999. "Tolerance Chain Detection by Geometrical Constraint Based Coupling Analysis", Journal of Engineering Design, Vol. 10, Berlin, Alemania. Núm 1.
- SRINIVASAN, S., 2003. "Simultaneous Dimensional and Tolerance Synthesis in Process Planning". Thesis Master of Science in the Department of Mechanical Industrial and Nuclear Engineering of the College of Engineering. . Cincinnati.India.
- SRINIVASAN, S., et al. 1996. "Functional Tolerancing: A Design for Manufacturing Methodology". Research in Engineering Design. Cincinnati.India. Núm. 2. p. 99-115

- SRINIVASAN, V., 2001. "An Integrated View of Geometrical Product Specification and Verification", 7<sup>th</sup> CIRP Seminar on Computer Aided Tolerancing, ENS Cachan, Francia, Abril.
- STAMPFER, M.; RÉTFALVI, A., 2006. "Integrated Process and Fixture Planning System". 4th Serbian-Hungarian Joint Symposium on Intelligent Systems.
- SUDARSAN, R. et al., 2000. "Information Models for Design Tolerancing: From Conceptual to the Detail Design". Report NISTIR-6524. National Institute of Standards and Technology. Maryland. Estados Unidos. 80 pág.
- SVETKO, R. et al., 1998. "New metrics for evaluating Monte Carlo tolerance analysis of assemblies". Technical report. Mechanical Engineering Department. Brigham Young University.
- THOME, O.; WEBER, C., 2001. "Tolsys - A Tolerance Support System Based on Vectorial Tolerancing and Feature Technology", XII ADM International Conference. Associazione Nazionale Disegno di Macchine, DIEM c/o Fac. Ingegneria, Bologna, Italia, Septiembre, (D4-1) - (D4-10).
- VILLENEUVE, F., 1999. "Contribution a la Génération des Processus d'Usinage et a l'Intégration des Contraintes de Fabrication en Conception de Produits", Rapport en vue d'obtenir l'habilitation à diriger des recherches de l'Institut National Polytechnique de Grenoble, LURPA, ENS Cachan, Francia.
- VILLENEUVE, F.; Legoff, O.; Bourdet, P., 1999. "Three-Dimensional Geometrical Tolerancing in Process Planning", 32<sup>nd</sup> CIRP Seminar on Manufacturing Systems, Leuven, Bélgica, Mayo.
- WANG, N., T.M. OSZOY, 1993. "Automatic Generation of Tolerance Chains from Mating Relations Represented in Assembly Models". ASME (New York). Vol. 23. Núm. 1. p. 227-233.
- WEBER, C.; WERNER, B.; THOME, O., 1998. "Conversion of Geometrical Tolerances into Vectorial Tolerance Representations – A Major Step Towards Computer Aided Tolerancing", International Design Conference, Dubrovnik, Croacia, Mayo.
- WEILL, R., 1988. "Integrating Dimensioning and Tolerancing in Computer Aided Process Planning", Robotics and Computer Integrated Manufacturing (Pergamon Press), Vol. 4, Núm. 1-2, 41-48.
- WEILL, R., 1997. "Dimensioning and Tolerancing for Function", en Parsaei, H. R. y Zhang, H-C. (Eds.), "Advanced Tolerancing Techniques", John Wiley & Sons, Estados Unidos, 329-354.
- WILLHELM, R.; STEPHEN C.; Y. LU, 1992. "Tolerance Synthesis to Support Concurrent Engineering", Annals of the CIRP, Vol. 41, 197-200.



- XIANG, W.; CHUEN, W.; WONG, C.; YAM, H., 2002. "A Generative Feature-Based CAPP/CNC System for Hydraulic Manifold Blocas", *Int J Adv Manuf Technol* 19:805–811.
- YU, D., et al., 2005. "Process-oriented tolerancing for multi-station assembly systems". *IIE Transactions*. Vol. 37. p. 493–508.
- YUJING, F., 2004. "A CAD based Computer-Aided Tolerancing Model for the Machining Process". [Tesis de Maestría]. Indiana University South Bend.
- ZHANG, C.; LUO, J.; WANG, B., 1999. "Statistical Tolerance Synthesis using Distribution Function Zones". *International Journal of Production Research*, Vol. 37, Núm. 17, 3995-4006.