

Capítulo 2

Antecedentes y tendencias de las dimensiones y tolerancias asistidas por ordenador

2.1. Introducción

Este Capítulo tiene por objetivo describir las tendencias existentes respecto a las dimensiones y tolerancias asistidas por ordenador, sobre la base de la revisión bibliográfica realizada. En cada una de las temáticas de investigación se resaltan los autores más representativos y los aspectos más relevantes.

Además, se exponen las relaciones que existen entre los autores más representativos de cada línea de investigación y las perspectivas de cada temática.

2.2. Las tolerancias y la Ingeniería Concurrente

El término Ingeniería Concurrente, muchas veces denominado Ingeniería Simultánea, fue desarrollado en los Estados Unidos en el año 1989. Este concepto implica la integración de varias actividades del proceso de desarrollo y producción de un producto, de la forma más paralela posible (Figura 2.1).

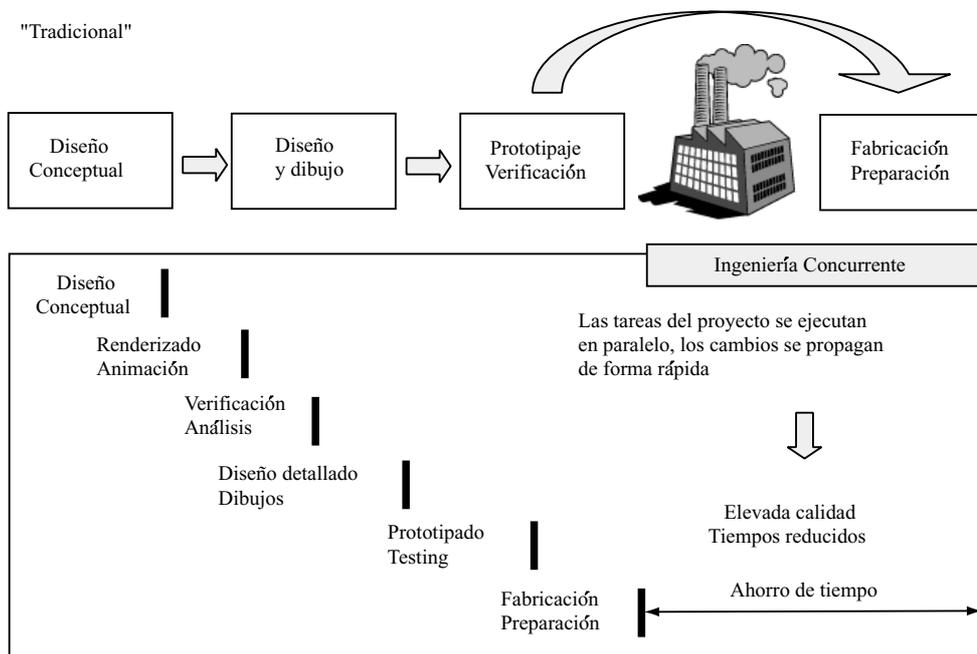


Figura 2.1. La Ingeniería Concurrente expresada por la Región Europea (Soh, 1992)

Uno de los aspectos conceptuales más importantes de la Ingeniería Concurrente consiste en considerar la variación dimensional de las piezas de forma simultánea al diseño del producto. En este paradigma, las tolerancias relativas al proceso de diseño y las relativas al proceso de fabricación se analizan y se especifican de forma simultánea. Para llevar a cabo esta tarea, el diseñador debe de tener acceso a toda la información del producto en cada etapa del proceso de diseño.

Desde el punto de vista de las tolerancias, esta información comprende el modelo geométrico, los procesos de fabricación disponibles, los requerimientos del producto, los datos de inspección, etc. En la Figura 2.2 se pueden apreciar los tres módulos fundamentales que componen la gestión de las tolerancias:

- *Módulo de especificación:* En este módulo se cuestiona cuáles son las tolerancias más adecuadas para el ensamble en función de los requerimientos funcionales.
- *Módulo de análisis:* En este módulo se analiza cuáles son las repercusiones de las tolerancias en los requerimientos funcionales.
- *Módulo de síntesis:* En este módulo se realiza una optimización o un ajuste de los valores de las tolerancias conociendo los requerimientos funcionales y los medios de fabricación.

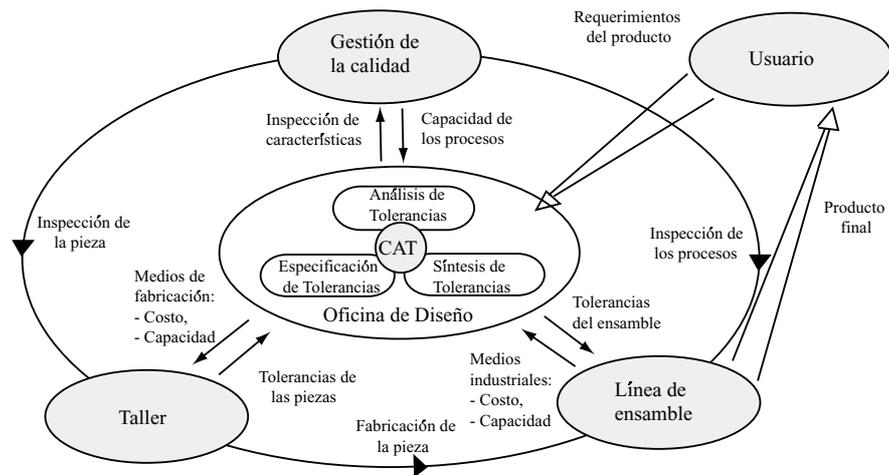


Figura 2.2. Las herramientas CAT en la Ingeniería Concurrente (Mar, 1997)

Estos tres módulos se encuentran insertados dentro de la perspectiva de la Ingeniería Concurrente, poseen vínculos con la gestión del taller —herramientas de fabricación y caracterización de las tolerancias de las piezas—, con la línea de ensamble —medios industriales, caracterización de las tolerancias del ensamble—, con la gestión de la calidad —caracterización de la inspección, capacidades de los procesos— y con el usuario —requerimientos del producto— a través de la oficina de diseño (Mar, 1997).

Sólo aparece un software denominado Valysis/Assembly –Tecnomatix– que permite un vínculo entre el análisis de tolerancias y la inspección a través de su propio sistema CAD: AssemblyDesign. Muchos de los sistemas CAD analizados están diseñados para una o hasta tres plataformas, pero ninguno tiene una arquitectura abierta. Resulta necesario el desarrollo de herramientas que permitan realizar la síntesis de tolerancias en los sistemas CAD, vinculadas con la gestión del conocimiento y con la especificación de los requerimientos funcionales en las etapas primarias del proceso de diseño.

2.3. 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, éstas 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 *CAD/CAM* han propiciado un incremento en los esfuerzos por automatizar los procedimientos relacionados con las dimensiones y tolerancias (Pér, 2000^b).

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 las tres líneas fundamentales de investigación, destacando a los autores más representativos.

2.3.1. Modelización/Representación de dimensiones y tolerancias

La modelización o representación de dimensiones y tolerancias asistidas por ordenador constituye la línea de investigación más tratada por los autores. El desarrollo actual de los sistemas informáticos ha propiciado un crecimiento elevado de este tipo de estudio. De forma general, en el entorno de la modelización/representación de tolerancias los trabajos de investigación se pueden agrupar de la siguiente manera:

- a) La modelación/representación geométrica, de autores como Hylliard y Braid (Hil, 1978), Requicha (1980, 1982, 1984, 1986), Lin y Gossard (Lin, 1981), Kulkarni y Pande (Kul, 1996) y Juster (Jus, 1992).
- b) La modelación/representación de tolerancias geométricas, de autores como Requicha (Req, 1983), Jayaraman y Srinivasan, Bourdet (Bou, 1995).
- c) El desarrollo de modeladores de sólidos, de autores como Brown (Bro, 1982), Roy y Liu (Roy, 1988^a), Moroni (Mor, 1996), Roy *et al.* (Roy, 1997) y Ramani *et al.* (Ram, 1998).
- d) Formas de modelar y representar las uniones, de autores como Clément (Clé, 1994) y Schneider (Sch, 1994).
- e) El modelado de las especificaciones de tolerancias, de autores como Rivest *et al.* (Riv, 1993), Lafond y Laperrière (Laf, 1999), (Cen, 1999) y Srinivasan (Sri, 2001).
- f) Dimensiones y tolerancias funcionales, de autores como Weill (Wei, 1988, 1997), Ballu y Mathieu (Bal, 1995; Mat, 1997^a), Anselmetti (Ans, 1995^a), Srinivasan (Sri, 1996) y Marguet y Mathieu (Mar, 1997).
- g) La representación vectorial de las tolerancias, de autores como Weber (Web, 1998), Yau (Yau, 1997) y Thome (Tho, 2001).
- h) La definición y representación matemática de las tolerancias, de autores como Etesami (Ete, 1993), Bourdet (Bou, 1994), Wilhelm (Wil, 1997) y Clément (Clé, 2000).

A continuación se expone de forma más explícita, algunas de las investigaciones más relevantes en esta área.

El sistema PADL-1, desarrollado en la Universidad de Rochester en la mitad de la década de 1970, fue el primer modelador de sólidos que representó información relacionada con las tolerancias. El esquema de tolerancias del PADL-1 se basó en las tolerancias paramétricas, que permite especificar las variaciones posibles en las piezas a través de los valores o parámetros utilizados para definir la pieza. A partir de este sistema surgieron esquemas más elaborados, reportados en numerosas publicaciones (Lin, 1981; Req, 1980, 1982, 1984, 1986; Tru, 1988; Leh, 1989).

En la actualidad existe una gran diversidad de modeladores de sólidos y muchos de ellos poseen varias formas de representar las dimensiones y las tolerancias. En esta área de investigación se ha estudiado de forma intensiva la «validez» e «integridad» de éstas representaciones para garantizar que en ningún caso se produzca un exceso o un déficit de dimensiones y tolerancias en el sistema (Req, 1980; Sán, 1989; Jus, 1992; Kul, 1996; Smi, 1996; Pot, 1997; Flo, 1999).

En un sistema *CAD* tradicional las dimensiones y tolerancias se especifican manualmente, constituyendo una pérdida considerable de tiempo. Varios investigadores han estudiado la integración de las dimensiones y tolerancias en los modeladores de sólidos, pues éstos proporcionan todos los datos geométricos relativos a un objeto. Minagawa *et al.* lograron algunos avances en el desarrollo de un sistema de acotado totalmente automático —AUTDIM— basado en un modelador de sólidos con estructura *CSG*, el TIPS-1 (Roy, 1991).

Yuen, Tan y Yu presentaron un esquema general para el acotado automático de un objeto a partir de su representación de fronteras —*B-Rep*— y reportaron su aplicación en el modelador de sólidos PADL-2 basado en la estructura *CSG*. En este esquema, la interpretación de la semántica de las prácticas del acotado convencional ha sido vista como las relaciones entre las entidades geométricas. Para representar adecuadamente el acotado de un objeto se construye un árbol de acotado, de modo que todas las superficies límites del objeto se encuentren en este árbol. Su implantación no estuvo

acorde totalmente con las normas de dibujo y la generación automática del acotado requiere de modificaciones manuales (Yue, 1988).

Uno de los autores más representativos en el desarrollo del modelado de sólidos y las tolerancias ha sido Requicha, este autor desarrolló una teoría basada en el concepto de «clase variacional». Las clases «variacionales» son clases de familias de objetos que son similares a un objeto nominal, son intercambiables en el ensamble y son funcionalmente equivalentes (Figura 2.3). A través de esta definición, un objeto es considerado que se encuentra dentro de los límites establecidos por la tolerancia fijada, si las fronteras de sus elementos de forma se encuentran en el rango especificado por la zona de tolerancia. Este autor también ha desarrollado conceptos tales como zona de tolerancia, zona paramétrica, sistema válido y completo, etc. (Req, 1982, 1984).

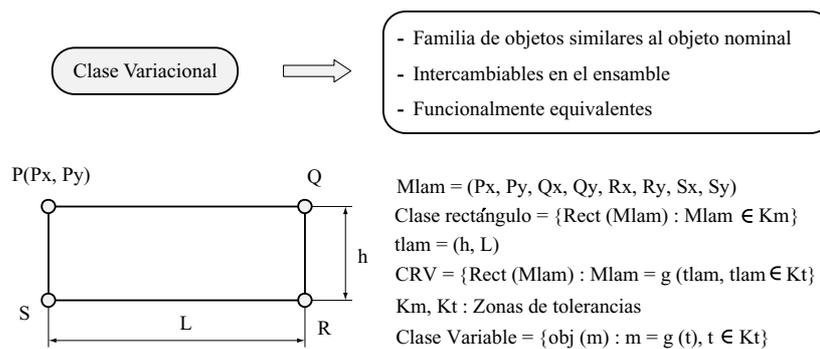


Figura 2.3. Las clases variacionales (Req, 1983)

La «zona de tolerancia» está definida sobre el dominio de una región construida por «offset» de las fronteras nominales de la pieza, en ésta zona la información de las tolerancias está especificada dentro de un conjunto de atributos geométricos en la superficie de los elementos de forma del objeto.

Una teoría formal para las operaciones de «offset» ha sido extensamente tratada por Rossignac (Ros, 1986) en un intento de combinarla con las operaciones booleanas y de sólido rígido en un esquema extendido del esquema CSG. Sin embargo, este tipo de representación de tolerancias en términos de zonas de tolerancias propuesto por Requicha difiere en algunos aspectos de la normativa ISO (ISO, 1981, 1985^a, 1985^b, 1987^a, 1987^b).

A partir de las bases establecidas por Requicha, otros investigadores como Chan implementaron la representación de tolerancias y otras informaciones variacionales en un modelador de sólidos basado en el esquema CSG, el PADL-2. La información variacional está asociada con el modelo de sólidos a través de un gráfico denominado «*VGraph*» o «*gráfico variacional*».

El subsistema «*VGraph*» tiene habilidades limitadas para describir las tolerancias de diseño. Este esquema representacional aún no ha demostrado su idoneidad para el análisis de tolerancias, aunque fue estudiado por otros autores (Bro, 1982; Tru, 1988; Req, 1986). En fecha más reciente, Moroni y Requicha desarrollaron un modelador experimental de tolerancias, con la intención de poder vincularlo a los modeladores de sólidos que existen en el mercado, basado también en el «*VGraph*» (Mor, 1996).

Jayaraman y Srinivasan examinaron la representación de las tolerancias geométricas en los modeladores de sólidos desde la perspectiva de los requerimientos funcionales vinculados a la geometría de las piezas. Su investigación se centró en el posicionamiento de las piezas en un ensamble. Los autores desarrollaron el concepto de «*requerimientos virtuales límites*» —*VBRs*— para reflejar las condiciones funcionales requeridas en el ensamble y discutieron las bases teóricas de la interpretación de estos requerimientos virtuales límites con la ayuda de la teoría del «*offsett*» en los modeladores de sólidos, como propusieron Rossignac y Requicha (Sal, 1995).

Existen otros dos proyectos en la cuestión representacional: el CAM-I (Roy, 1991) y el ICAM. Ambos proyectos se basaron en una estructura de datos de tipo *B-Rep* en un modelador de sólidos. El CAM-I propuso la construcción de un modelador de dimensiones y tolerancias acoplado a un modelador geométrico. El modelo «*evaluador de dimensiones y tolerancias*» —*EDT*— ha sido diseñado para representar las diferentes clases de elementos de forma que se acotan según la norma ANSI Y14.5M. Este modelo es aplicable solamente para las tolerancias dimensionales y de situación. Está limitado a entidades geométricas como superficies planas, cilíndricas, cónicas y esféricas.

En el sistema GEOTOL de Turner se intenta asociar la información de las tolerancias con la representación de fronteras de la pieza. Para la implementación de las dimensiones y tolerancias, Roy y Liu (Roy, 1988^a) mostraron la necesidad de crear un

modelo híbrido con una estructura de datos *CSG/B-Rep* para representar las tolerancias y así explotar las ventajas de ambos tipos de representaciones. Esta representación de tolerancias ha sido implementada en una estación de trabajo basado en el modelador de sólido poliédrico tipo *B-Rep* TWIN.

Por su parte, Iwata desarrolló la concepción de un modelo integrador del producto, donde la definición de la pieza incluye toda la información necesaria. Este modelo puede ser construido por la combinación de la información tecnológica y la información obtenida del modelador de sólidos. Otros investigadores en Japón, han desarrollado un tipo similar de esquema para el modelado de objetos basado en el modelador de sólidos GEOMAP-III. En este sistema, la evaluación y el análisis de las tolerancias están soportados con un alcance limitado. Se implementó como COMET/DB en un entorno LISP (Figura 2.4).

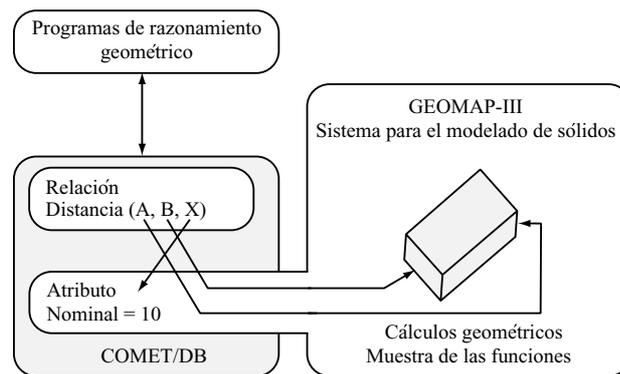


Figura 2.4. Esquema general del modelo COMET/DB (Roy, 1991)

Yu propuso un sistema variacional para la modelación de sólidos —*V-SOLID*—, para incorporar las prácticas industriales de las dimensiones y tolerancias en la representación de frontera de un objeto, compatible con los dibujos de Ingeniería. Las dimensiones y tolerancias son tratadas como restricciones geométricas en el *V-SOLID*. Estas relaciones de restricciones están explícitamente codificadas en una estructura gráfica denominada «jerarquía dimensional», donde se describen las tolerancias convencionales y geométricas. La entrada de datos del sistema de Yu proviene de la información general obtenida de los dibujos convencionales (Roy, 1991).

También existen investigaciones en este ámbito relacionadas con los sistemas expertos, como el GARI (Des, 1984) donde se utilizó la información del dibujo como método de entrada al sistema. Este sistema experto no se encuentra vinculado con ningún modelador de sólidos. Más reciente, Kin y de San Lazaro desarrollaron un sistema experto —*REFIX*— para el diseño de dispositivos que tiene en cuenta las tolerancias de fabricación (Kin, 1994).

En un intento de lograr un lenguaje de las tolerancias a través de una formulación matemática, varios autores han desarrollado modelos matemáticos que representan a las tolerancias. Etesami desarrolló un modelo matemático para la representación de las tolerancias geométricas en un intento de formalizar la especificación de este tipo de tolerancias —*TSL*— (Ete, 1993). En este modelo las tolerancias no se clasifican por tipos y no existen restricciones en la utilización de los tipos de «*características*».

Bourdet *et al.* desarrollaron un método matemático para el control de tolerancias de posición compuestas, utilizando máquinas de medición por coordenadas (Bou, 1994). Wilhelm expone una definición matemática de las tolerancias geométricas, de forma similar a la expuesta por Etesami, basándose en la norma ANSI Y14.5M (Wil, 1997).

Otros autores han desarrollado modelos que intentan responder a las imprecisiones e insuficiencias de las normas, como es el caso del modelo para la especificación geométrica de las piezas —*GEOSPELLING*— propuesto por Ballu y Mathieu. El modelo está basado en el análisis de las actuales normas ISO relacionadas con las tolerancias. Los autores definen las características geométricas en la propia definición geométrica de las piezas; las operaciones utilizadas para manipular estas características y la expresión de las condiciones funcionales que deben de satisfacer (Bal, 1993, 1995; Mat, 1997^a).

Con el modelo de Wirtz, denominado «*tolerancias vectoriales*», las características geométricas de las piezas son definidas a través de la geometría vectorial. Cada característica de cada pieza se describe a través de tres vectores especificados en un sistema de coordenadas. Estos vectores representan la posición, orientación y dimensión de la característica (Yau, 1997; Web, 1998). Este difiere completamente con el lenguaje normalizado acerca de las tolerancias. A partir de este modelo, varios autores han propuesto aplicaciones acopladas a sistemas *CAD* (Tho, 2001).

A partir de los trabajos previos en el campo de la inspección asistida por ordenador y los trabajos de Requicha, Jayaraman y Srinivasan, y Wirtz, Clément *et al.* desarrollaron un modelo para la representación de las tolerancias, que es compatible con las normas vigentes y posee un fundamento matemático. El modelo propuesto fue denominado *TTRs* (Figura 2.5).

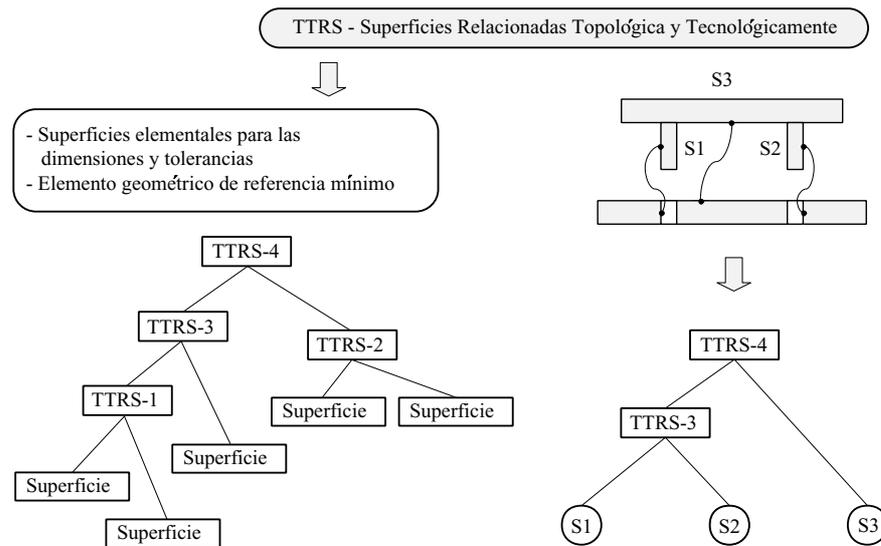


Figura 2.5. Superficies relacionadas topológica y tecnológicamente (Clé, 1994)

En este modelo, en vez de utilizar los usuales esquemas para el modelado de sólidos *CSG* o *B-Rep* a partir de los cuales se pueden identificar los elementos funcionales, los autores se basan en su propia estructura de datos de asociaciones binarias ente los elementos funcionales —o superficies— de las piezas en el ensamblaje. Este modelo ha sido parcialmente adoptado por el sistema *CAD* CATIA (Des, 1994; Clé, 1994; Sal, 1995). Las *TTRs* representan una variante de las relaciones o casos elementales de los elementos de forma o características básicas —«*features*».

Lafond y Laperrière presentaron un modelo matemático para representar cadenas de tolerancias en 3D para los requerimientos funcionales. El proceso de modelado utiliza el concepto de «*uniones virtuales*» y simula las pequeñas desviaciones de los elementos funcionales (Laf, 1999).

En la actualidad existe una gran variedad de formas de representación de las dimensiones y tolerancias. Estas representaciones están en función del tipo de modelador de sólidos que se utilice y no poseen una teoría formal que permita desarrollar un modelo universal de representación.

Se observa que las capacidades de éstos modeladores deben de mejorarse en cuanto al tratamiento de las tolerancias. Los futuros sistemas *CAD* deben de poseer una estructura de datos que permita al usuario el acceso a las entidades geométricas de bajo nivel y de alto nivel. Además, es necesario el desarrollo de una base matemática para las tolerancias, independientemente de cualquier representación por ordenador.

2.3.2 Análisis de dimensiones y tolerancias

El análisis de dimensiones y tolerancias es 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. En la Figura 2.6 se muestra un ejemplo típico del problema del análisis de dimensiones y tolerancias.

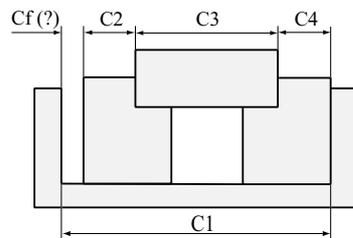


Figura 2.6. Representación de un caso de análisis de dimensiones y tolerancias

Aunque la resolución del análisis de dimensiones y tolerancias es un problema matemáticamente sencillo —sumas y restas—, su integración a los sistemas *CAD* no resulta fácil. Los sistemas *CAD* interpretan a las tolerancias como atributos externos no integrados en sus bases de datos (Ciu, 1997).

Las investigaciones se han encaminado hacia el desarrollo de técnicas estadísticas y determinísticas para el análisis de tolerancias. La técnica estadística más empleada es la simulación por el método de Monte Carlo y la técnica determinística más aceptada invocada por Hillyard (Hil, 1978) es el método de la «*geometría variacional*». En el entorno del análisis de dimensiones y tolerancias se incluyen los siguientes trabajos investigativos:

- a) Asignación de tolerancias en función de los métodos de fabricación y/o los costes, de autores como Hoffman (Hof, 1982), Anselmetti (Ans, 1983, 1993), Fainguelernt, Weill y Bourdet (Fai, 1986), y Liu (Liu, 1996).
- b) Asignación de tolerancias basado en las normativas ISO, de autores como Dong (Don, 1990).
- c) Asignación de tolerancias estadísticas, de autores como Evans (Eva, 1974, 1975) y Parkinson (Par, 1985); y el desarrollo de modelos estadísticos para la resolución del problema del análisis de tolerancias de autores como Chase (Cha, 1988, 1991, 1996, 1997^a, 1997^b), Emch (Emc, 1994), Gao (Gao, 1998^a, 1998^b, 1998^c) y Svetko (Sve, 1998).
- d) Estudios para la elaboración de las cadenas de cotas, de autores como Wang (Wan, 1993), Portman (Por, 1995) y Söderberg (Söd, 1999^a).
- e) Simulación de mecanismos para la deducción de las tolerancias, de autores como Söderberg (Söd, 1992, 1999^b, 2000), Lehtihet y Dindelli (Leh, 1989), McCann (McC, 1992) y Johannesson (Joh, 2000).
- f) Generación de flujos para el estudio del análisis de tolerancia, de autores como Martino y Kimura (Mar, 1992).
- g) La transferencia de cotas como un problema semejante al análisis, de autores como Serrano (Ser, 1993, 1994).
- h) La aplicación de la Inteligencia Artificial y los Sistemas Expertos al análisis de tolerancias, de autores como Baharin (Bah, 1993).

A continuación se exponen algunas reflexiones sobre los trabajos de investigación más destacados.

Una de las formas más utilizadas para asignar las tolerancias es a partir de los datos que proporcionan los procesos de fabricación y/o sus costes (Fai, 1986; Liu, 1996). Este enfoque se basa en la asignación de las tolerancias a una determinada cota en función de la operación tecnológica en concreto. Otros estudios más extensos además de considerar la operación tecnológica tienen en cuenta las máquinas herramientas disponibles, las herramientas de corte, la colocación de las piezas (Ans, 1983), los pasos tecnológicos y los costes de fabricación (Wei, 1988; San, 1998; Jea, 1997).

Otra 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 (Sri, 1996), (Eva, 1974, 1975), (Nig, 1995), Chase (Cha, 1988, 1991, 1996, 1997^a, 1997^b), Gao (Gao, 1998^a, 1998^b, 1998^c) y Svetko (Sve, 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 costes 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. Los métodos para el análisis estadístico pueden ser categorizados en cuatro clases fundamentales (Eva, 1975; Chase, 1988; Nig, 1995; Nar, 1998; Sud, 2000): acumulación de tolerancias o propagación lineal; propagación no lineal; integración numérica y simulación por el método de Monte Carlo —método más utilizado.

Existen diversos autores que abordan la interpretación de las relaciones existentes entre las piezas de un conjunto mecánico (Ser, 1993, 1994; Sch, 1994) y la generación automática de las cadenas de cotas a partir de la información contenida en las bases de datos o de la información gráfica disponible (Wan, 1993). El algoritmo para la generación de las cadenas de cotas se desarrolló siguiendo una estrategia de modelación del ensamble basado en características, para representar a cada componente en relación directa con sus dimensiones y tolerancias. El algoritmo no contempla la consideración de los requerimientos funcionales.

La simulación de los ensambles es otra de las líneas de investigación en el análisis de tolerancias (Söd, 1992). En este caso, a partir de las dimensiones conocidas se simula el proceso de ensamblaje y las tolerancias son asignadas como un atributo externo a las dimensiones ya conocidas. Luego el usuario definirá la cadena de cotas y el sistema reconoce las dimensiones y tolerancias, simula las condiciones extremas y determina la dimensión resultante y el campo de tolerancia. Esta simulación permite la resolución del problema pero necesita la aportación de información y el control del proceso de formación de la cadena de cotas por parte del usuario.

Existe un tipo de estudio que se enmarca en el análisis y síntesis de dimensiones y tolerancias que tiene como objetivo establecer flujos de razonamientos para la asignación de las tolerancias (Mar, 1992). Estos flujos constituyen una ayuda en el desarrollo del análisis de dimensiones y tolerancias con la finalidad de cumplir con un orden riguroso la ejecución de las operaciones. Los flujos se caracterizan por ser genéricos y considerar aspectos ya vistos como la fabricación, los costes, la colocación, la entrada de datos externos, etc. Uno de los conceptos que incluye la línea de investigación referente al análisis de dimensiones y tolerancias es la transferencia de cotas. Muchos de los autores que trabajan con el concepto de transferencia de tolerancias se han identificado con el problema del análisis de cotas (Fai, 1986; Ser, 1994).

Baharin *et al.* (Bah, 1993) propusieron el desarrollo de un sistema experto vinculado a un sistema *CAD*, con el objetivo de extraer de las bases de datos, las características más relevantes. En la Figura 2.7 se puede apreciar la estructura del sistema *ICATS*.

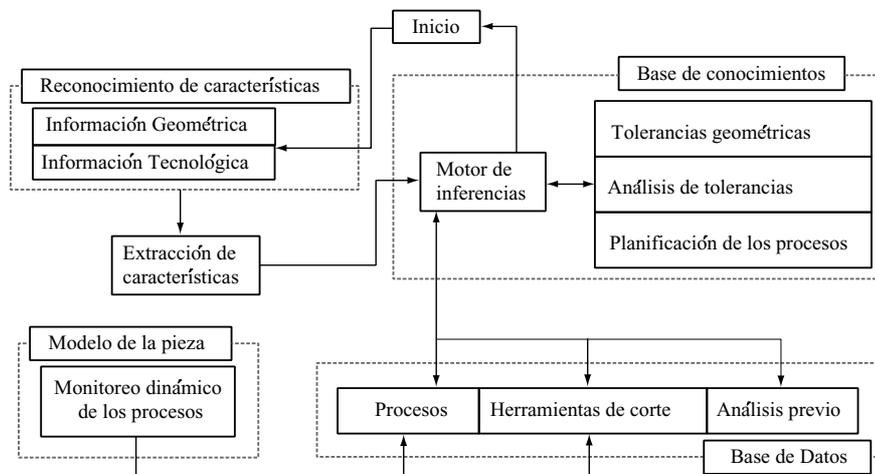


Figura 2.7. Estructura del sistema ICATS (Bah, 1993)

Los autores sólo abordan la tipología de piezas cilíndricas y centran el sistema a la resolución de las tablas de tolerancias. No tienen en cuenta la consideración de los requerimientos funcionales en las etapas primarias del proceso de diseño.

También se engloba dentro del análisis de dimensiones y tolerancias la creación de los modelos metrológicos, que son las reglas creadas para la corrección de las fórmulas en los algoritmos o procedimientos generados para la corrección de las características a cumplir en las piezas. Estas reglas dependen de la geometría nominal y, por tanto, están vinculadas con las dimensiones (Fen, 1991)

Varios autores han desarrollado diversos sistemas informáticos que intentan resolver las inquietudes expuestas anteriormente. Entre ellos se encuentran sistemas como AUTONA para la asignación automática de tolerancias a partir de una base de datos (Roy, 1991); CATI para la simulación del ensamble (Söd, 1992); el algoritmo de clase variacional que aporta información del ensamble en 3D en una base de datos (Roy, 1988^b); GEOTOL, TOLCON (Leh, 1989) que utiliza la información referente a la fabricación; CATAP, CATAP-II que utilizan una base de datos ajustada a la normativa ISO y TOLTECH (Bjö, 1989) para la asignación de tolerancias.

Como se puede apreciar, el proceso de análisis de tolerancias se ha integrado de forma satisfactoria en los modeladores de sólidos para sistemas *CAD* con altas prestaciones (Tabla 2.1). En esta área se manifiesta un interés creciente por el desarrollo de herramientas que permitan realizar el análisis de tolerancias en los modeladores de sólidos en 3D.

Tabla 2.1. Módulos *CAT* para el análisis de tolerancias

Módulo CAT	Modo	Sistema CAD	Fuente
TOLTECH	2D	-	Production Engineering Laboratory (1980)
GEOTOL	2D	-	Rensselaer Polytechnic Institute (1988)
TOLCON	2D	-	Pennsylvania State University (1989)
Mechanical Advantage	2D	-	Cognition (1991)
Analytix	2D	-	Saltire Software (1991)
GEOS	2D	-	Saltire Software (1992)
AutoCATS	2D	AutoCAD	Brigham Young University (2000)
TI/TOL 3D+ ↔ VSA(GDT-3D-2D)/Pro	3D	Pro/Engineer i ²	Parametric Technology (2000)
CAT VSA-3D	3D	CATIA	Dassault Systemes-IBM (2000)
CV-CATS	3D	CADDS 5i ²	Parametric Technology (2000)
VSA-3D/UG	3D	Unigraphics	Electronic Data System (2000)
I-DEAS VSA-3D	3D	I-DEAS	SDRC (2000)
VALYSIS	3D	-	Technomatix Technologies (2000)

2.3.3. 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 (Ciu, 1997).

La síntesis o distribución de dimensiones y tolerancias es el proceso inverso al análisis, a través del cual se puede lograr una distribución de las tolerancias de las piezas durante la fase de diseño. En la Figura 2.8 se muestra un caso típico de síntesis de dimensiones y tolerancias, donde se tiene una cota conocida, la cual debe de distribuirse entre las cotas componentes de la cadena dimensional, que son las variables a determinar.

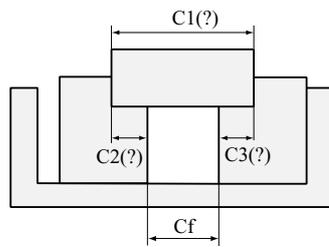


Figura 2.8. Representación de un caso de síntesis de dimensiones y tolerancias

Los trabajos investigativos desarrollados acerca de la síntesis de dimensiones y tolerancias funcionales pueden enmarcarse en las siguientes líneas:

- Métodos para la distribución de tolerancias, tendencia descrita por autores como Wilhem (Wil, 1992).
- La asignación de tolerancias basada en los procesos productivos, de autores como Bourdet (Bou, 1982), Zhang (Zha, 1992), Anselmetti (Ans, 1995^a, 1995^b), Weill (Wei, 1988) y Villeneuve (Vil, 1999^a, 1999^b).
- Síntesis de tolerancias basada en las condiciones funcionales, de autores como Viaud (Via, 1983), Weill (Wei, 1997) y Ciurana (Ciu, 1997, 2000^a, 2000^b).

- d) Estudios para la elaboración de las cadenas dimensionales, de autores como Wang (Wan, 1993), Portman (Por, 1995) y Söderberg (Söd, 1999^a).
- e) Modelos estadísticos para la resolución del problema de la síntesis de dimensiones y tolerancias, de autores como Chase (Cha, 1990, 1999), Zhang (Zha, 1999) y Sudarsan (Sud, 2000).
- f) 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 (Ser, 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 (Ciu, 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.

El análisis comparativo de ambos métodos permite explicar por qué muchos trabajos son coincidentes con el análisis y la síntesis de dimensiones y tolerancias. Uno de los conceptos que tienen similitud en ambas esferas de investigación es la transferencia de tolerancias (Ser, 1994). Dentro de la síntesis de dimensiones y tolerancias se ha estudiado la asignación de las tolerancias a una dimensión siempre que ésta sea conocida. Muchos de los trabajos investigativos han asignado las tolerancias siguiendo procedimientos de la normativa ISO (ISO, 1981, 1985^a, 1985^b, 1987^a, 1987^b), por criterios estadísticos o criterios productivos.

Por otra parte, algunos autores asignan las tolerancias en función de los métodos productivos y los costes (Figura 2.9). En estos casos, la resolución de las inecuaciones es imposible sin la utilización de datos adicionales como la colocación de la pieza en la máquina herramienta, capacidad de las máquinas herramientas y fases de producción (Wei, 1988; Zha, 1992).

En fecha más reciente, Villeneuve *et al.* (Vil, 1999^a, 1999^b) han desarrollado métodos analíticos donde incorporan a la síntesis de tolerancias el tratamiento de los métodos productivos. Chase *et al.* (Cha, 1990) introducen un procedimiento para la especificación de tolerancias basado en estimaciones cuantitativas de los costes 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.

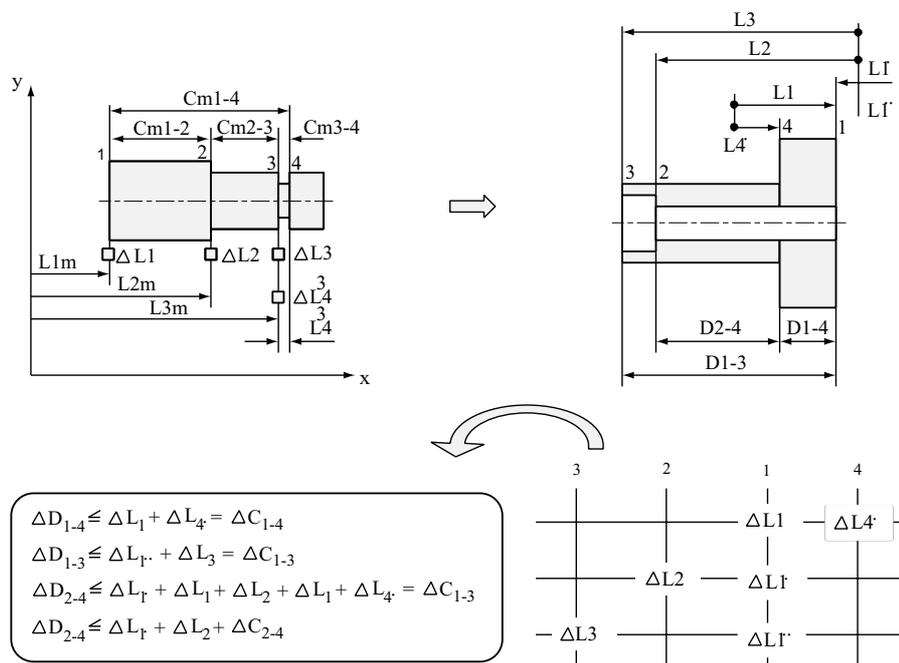


Figura 2.9. Modelo de Weill basado en los métodos productivos y costes (Wei, 1988)

Michael y Siddall (Roy, 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. Este enfoque fue más elaborado e incorporado por Turner en un prototipo de sistema *CAD* denominado GEOTOL. Este sistema utiliza tres métodos para el análisis y síntesis de tolerancias: (a) programación lineal, (b) método de Monte Carlo, y (c) el método de los mínimos cuadrados. Estos métodos soportan los problemas de las tolerancias estadísticas y las tolerancias de los casos límites.

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.* (Cha, 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 (Zha, 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 el análisis de dimensiones y tolerancias y en la síntesis de dimensiones y tolerancias, que establecen flujos de razonamientos para la asignación de las tolerancias (Mar, 1992). Estos flujos se caracterizan por el hecho de ser capaces de abordar y considerar de forma global aspectos como la fabricación, los costes, 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 (Ser, 1994; Sch, 1994; Ciu, 1997, 2000^a, 2000^b) como, por ejemplo, condiciones de montaje, condiciones de posición, condiciones 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 (Wan, 1990; Por, 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.

Söderberg y Johannesson (Söd, 1999^a) 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.

En la línea de investigación de la síntesis de dimensiones y tolerancias existe al igual que en las dos líneas de investigación anteriores un número reducido de programas informáticos que resuelven parte del problema. Una de esas rutinas es el CATAP o CATAP-II (Pan, 1992), más avanzado que el primero que ayuda a realizar una primera aproximación a la distribución de tolerancias mediante métodos estadísticos. Ciurana (Ciu, 1997, 2000^a, 2000^b) establece los algoritmos para la resolución de la síntesis de cotas en los entornos *CAD* (Figura 2.10). El autor aborda la síntesis de tolerancias en la etapa del diseño básico y de detalle.

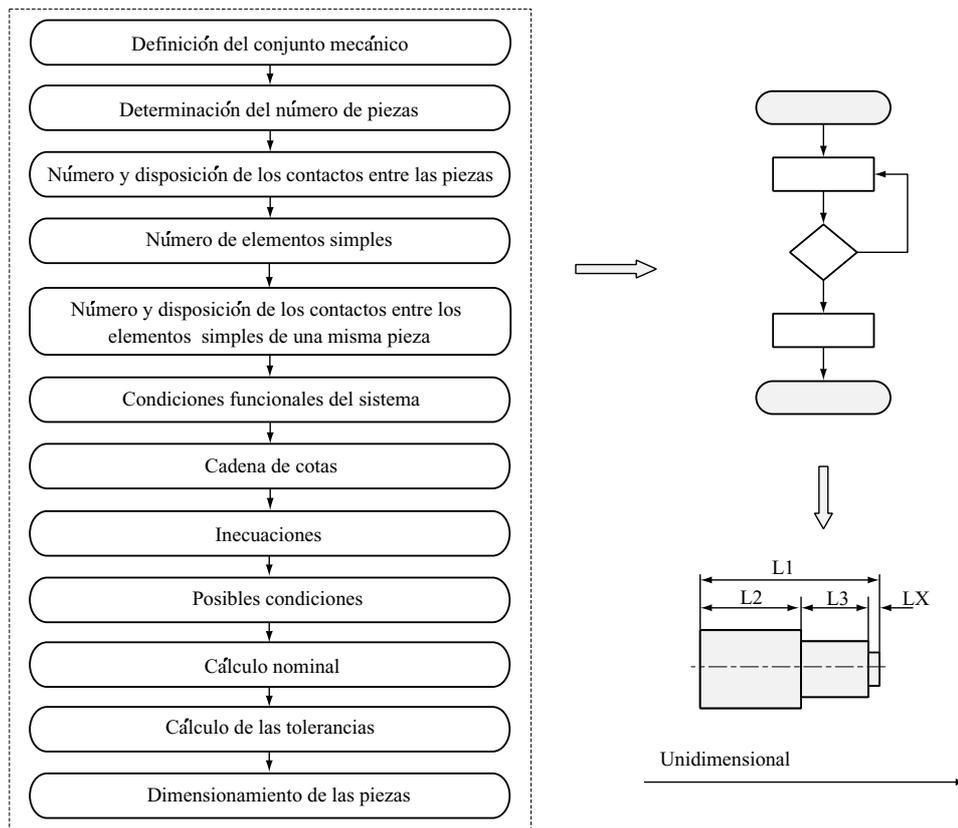


Figura 2.10. Acotación funcional unidireccional (Ciu, 1997)

La revisión bibliográfica muestra tendencias relacionadas con la utilización de sistemas basados en el conocimiento y sistemas expertos para la síntesis de tolerancias; la consideración de la síntesis de tolerancias en los modeladores de sólidos y la vinculación de la síntesis de tolerancias en la Ingeniería Concurrente (Tabla 2.2).

Tabla 2.2. Módulos CAT para la síntesis de tolerancias

Módulo CAT	Modo	Sistema CAD	Fuente
TOLTECH	2D	-	Production Engineering Laboratory (1980)
GEOTOL	2D	-	Rensselaer Polytechnic Institute (1988)
SIX SIGMA	2D	-	Motorola Corporation (1988)
CATAP	2D	AutoCAD	University of Oklahoma (1992)
CASCADE-T	2D	-	University of Illinois (1992)
GEOS	2D	-	Saltire Software (1992)
AutoCATS	2D	AutoCAD	Brigham Young University (2000)
CE/TOL 6σ	3D	Pro/Engineer i ²	Sigmatix (2000)

2.2.4. Relaciones entre las líneas de investigación

Para completar el estudio de la revisión bibliográfica en este Capítulo, a continuación se muestra las relaciones que existen entre las diferentes líneas de investigación, atendiendo a los autores más representativos por cada una de las áreas descritas en los epígrafes anteriores (Figura 2.11). A partir del análisis de este gráfico, se pueden deducir las siguientes conclusiones:

- La línea de investigación que posee más autores representativos es la modelación/representación de las tolerancias, siendo Requicha uno de los autores que más ha incidido en la creación de nuevos conceptos.

- La línea de investigación con menos autores representativos es la síntesis de tolerancias. Sin embargo, en los últimos años se aprecia un aumento en el interés por esta temática. El autor más representativo en esta línea es Bourdet.
- La ubicación de las líneas de investigación, a partir de los autores manifiesta la existencia de varios enfoques o escuelas: (a) la escuela norteamericana para la modelación/representación, (b) la escuela europea-norteamericana —con núcleos en Israel— para el análisis de cotas y (c) la escuela europea, destacada en el estado Francés, en la línea de la síntesis de cotas.

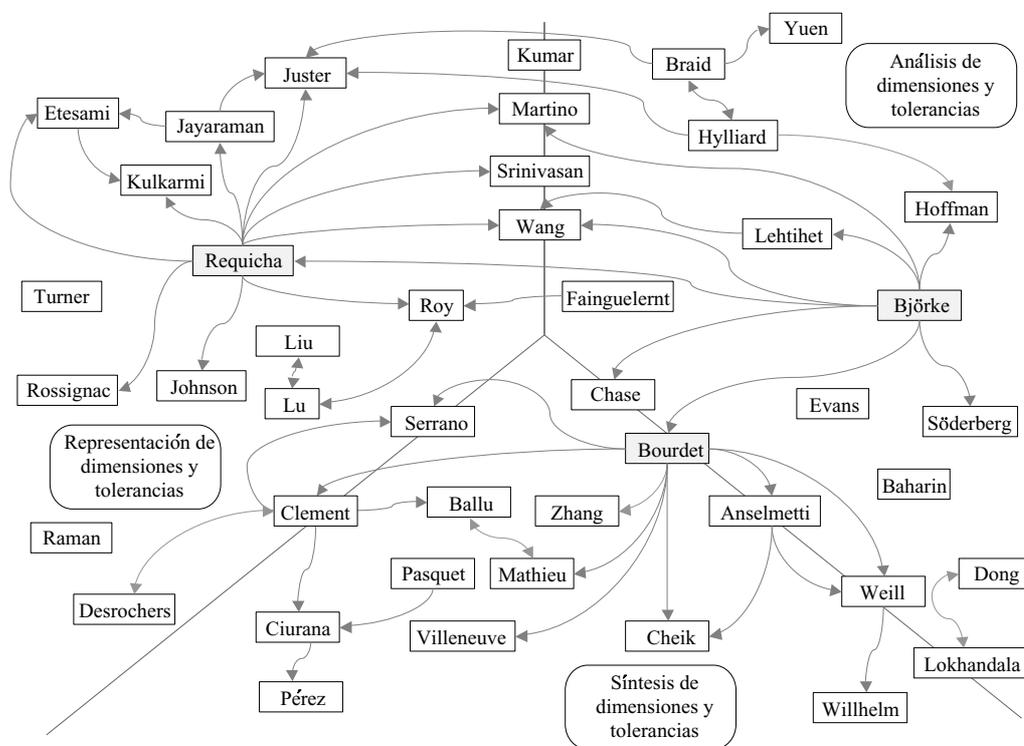


Figura 2.11. Relaciones entre los autores representativos de las líneas de investigación