

TECNOLOGÍA ASISTIDA POR COMPUTADORA

Héctor Omar Mina

Grupo Diseño, Gestión y
Desarrollo de Nuevos Productos

UTN - Facultad Regional San Francisco



UNIVERSIDAD
TECNOLOGICA
NACIONAL

UTN

TECNOLOGÍA ASISTIDA POR COMPUTADORA

Universidad Tecnológica Nacional – República Argentina

Rector: Ing. Héctor C. Brotto

Vicerrector: Ing. Pablo Rosso

edUTecNe – Editorial de la Universidad Tecnológica Nacional

Coordinador General: Ing. Ulises J. P. Cejas

Responsable de Ediciones: Ing. Eduardo Cosso

Área de Promoción y Comercialización: Fernando Cejas

Área Pre-prensa y Producción: Ing. Carlos Busqued

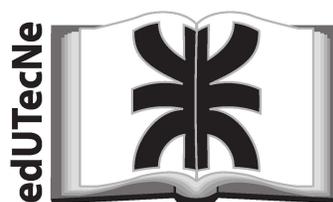
Área Publicaciones en Web: Téc. Bernardo H. Banega

Coordinador del Comité Editorial: Dr. Jaime A. Moragues

Asesor Académico: Dr. Marcos Cohen



<http://www.edutecne.utn.edu.ar>



Prohibida la reproducción total o parcial de este material sin permiso expreso de edUTecNe



TECNOLOGÍA ASISTIDA POR COMPUTADORA

**Grupo Diseño, Gestión y
Desarrollo de Nuevos Productos
UTN - Facultad Regional San Francisco**

**edUTecNe
Buenos Aires, 2016**

TECNOLOGIA ASISTIDA POR COMPUTADORA - 1a. edición

Ciudad Autónoma de Buenos Aires : edUTecNe, 2016.

6 p. : il. ; 21 x 29,7 cm.

ISBN 978-987-XXXXX-55-4

Revisión: Patricia Cejas

Diseño de tapa: Carlos Busqued

Impreso en Argentina - Printed in Argentina

ISBN 978-987-XXXXXXXX-55-4

Queda hecho el depósito que marca la ley 11.723

©edUTecNe, 2016

Sarmiento 440, Piso 6

(C1041AAJ) Buenos Aires, República Argentina

CONTENIDO

CAPÍTULO I – SISTEMAS CAD -PROCESO DE DISEÑO

CAPITULO II – ECODISEÑO

CAPÍTULO III – SISTEMAS CAM

CAPÍTULO IV – SISTEMAS CAD - CAM

CAPÍTULO V – SISTEMAS CAE

CAPÍTULO VI – CIM

CAPÍTULO VII - SISTEMAS CAPP

CAPÍTULO VIII – SISTEMAS PDM

CAPÍTULO IX – SISTEMAS PLM

CAPÍTULO X – SISTEMAS MRP

CAPÍTULO XI – SISTEMAS ERP

CAPITULO XII – PROTOTIPADO RÁPIDO

CAPÍTULO XIII – INGENIERÍA INVERSA

ANEXOS

PRÓLOGO

Es de sobra conocido el profundo impacto que ha generado en la producción de bienes y servicios, fundamentalmente en nuestro siglo XXI, la introducción de nuevos paradigmas asociados con el uso intensivo de ordenadores, en escalas que van desde los procesos puntuales hasta los sistemas integrados que asumen hoy dimensiones y alcances mundiales. Los avances registrados en las técnicas asociadas, como por ejemplo las de diseño y fabricación asistidas por ordenador, han sido, en el plazo de pocos años, tan grandes que resulta muy difícil mantener siquiera un estado de conocimiento aceptablemente actualizado sobre el tema para lo que se conceptúa como el que debe ser nivel de información adecuada para la toma de decisiones de un profesional de la ingeniería.

Dejamos de lado en la apreciación anterior la maestría requerida para actuar como operadores sobre estos temas, que por su complejidad exigen alto nivel de especialización profesional. Una excelente puerta de ingreso al campo que no solo informe sino motive para la profundización subsiguiente puede encontrarse, sin embargo, en textos como este, que de manera exhaustiva explora todos los alcances de las tecnologías.

Como la esfera de interés en estos temas excede el ámbito de la ingeniería y comprende a todos los que deben tomar decisiones gerenciales y empresariales, el libro más allá del rigor con que aborda los contenidos ofrece suficiente accesibilidad como para ser abordado por quienes no posean bagaje de conocimientos técnicos previos, y esto no es poco merito tratándose de un libro de texto.

Evidentemente, quien aborde la tarea de describir el estado del arte en esta materia debe ser alguien que posea un profundo saber acompañado por una capacidad didáctica y pedagógica que asegure que el enorme volumen de información de gran complejidad que para esto debe trabajarse sea puesto a disposición del lector adecuadamente estructurado, con organicidad, y accesibilidad conceptual.

Tal tarea es cumplida con suficiencia por el autor, dando muestras de su solvencia y, fundamentalmente, de la pasión que lo posee y lo ha llevado a liderar grupos de investigación que avanzan las fronteras del conocimiento en estos campos desde su ámbito de trabajo, la UTN FR San Francisco.

Ing. Raúl C. ALBERTO

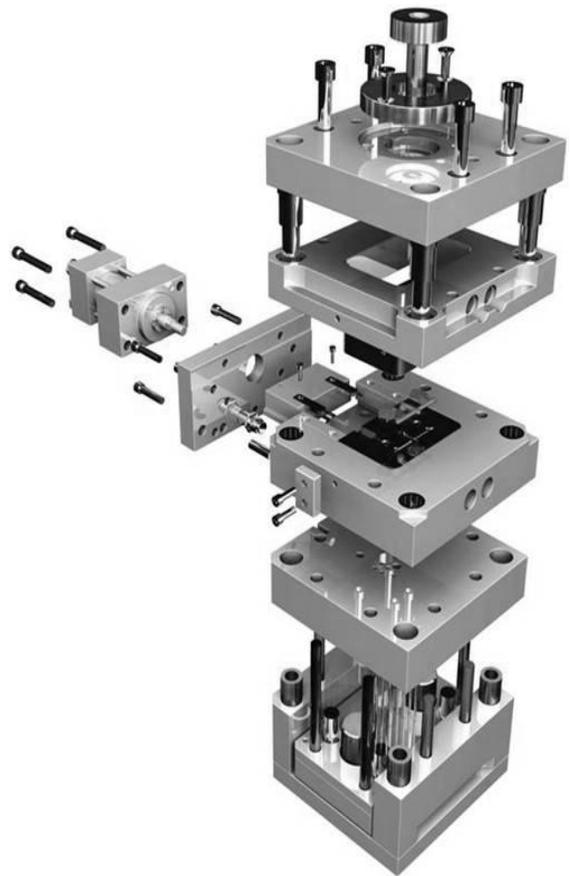
Ex Decano-Profesor

UTN Facultad Regional San Francisco-Córdoba

CAPITULO I

Sistemas CAD

Proceso de Diseño



1. PROCESO DE DISEÑO

El término diseño procede del vocablo italiano 'disegno'. En nuestro contexto se utiliza para caracterizar la representación gráfica, de acuerdo con una idea creativa previa, de un objeto artístico o funcional, de un dispositivo mecánico, o de la estructura o funcionamiento de un sistema o proceso.

Tradicionalmente el proceso de diseño sigue los siguientes pasos:

- **Definición.** Consiste en especificar las propiedades y cualidades relevantes del sistema a diseñar.
- **Concepción de un modelo.** Es el núcleo del proceso de diseño. El ingeniero concibe un modelo de sistema que satisface las especificaciones. El modelo deberá documentarse.
- **Dibujo de detalle.** La mayor parte de las cosas que se fabrican tienen algún tipo de representación gráfica natural que se utiliza como descripción "formal" del elemento a construir. Por ese motivo, antes de pasar al proceso de construcción, se deben generar gran cantidad de planos (o descripciones gráficas en general). El conjunto de documentos generados deben ser adecuados para describir el modelo con el suficiente detalle como para permitir la fabricación de prototipos con los que validar el diseño. Este paso puede requerir hasta un 50% del esfuerzo de diseño.
- **Construcción de prototipos.** Para elementos que se van a someter a un proceso de fabricación en cadena es normal fabricar previamente prototipos fuera de la cadena de montaje. Estos se fabrican con el propósito de detectar posibles errores en el modelo o la especificación y, en caso contrario, servir de validación para el mismo. No tienen que ser necesariamente un ejemplar completo del elemento a fabricar pudiendo utilizarse para validar determinadas propiedades.

A veces se utilizan prototipos con elementos que no se fabrican en serie como en ingeniería civil o arquitectura. En esta situación cabe destacar las maquetas para estudios de resistencia de materiales o comportamiento aerodinámico y las maquetas de arquitectura.
- **Realización de ensayos.** Tras la realización de ensayos sobre el prototipo se pueden descubrir deficiencias en el modelo o en la propia definición del sistema lo que obligará a volver atrás en el proceso revisando el diseño. Debe observarse que el dibujo de detalle está, en principio, dentro de este ciclo de revisión.
- **Documentación.** Una vez validado el diseño se pasa a documentarlo. La documentación debe contener la información suficiente como para poder abordar la construcción del sistema. La documentación puede estar formada por información muy diversa: descripción del sistema y de sus componentes, esquemas de montaje, lista de componentes, etc.

El proceso de diseño, representado en la Figura 1.1, sigue un esquema iterativo en el que el diseñador trata de encontrar un modelo que satisfaga determinados requerimientos, explorando posibilidades, siguiendo un ciclo de propuesta - valoración.

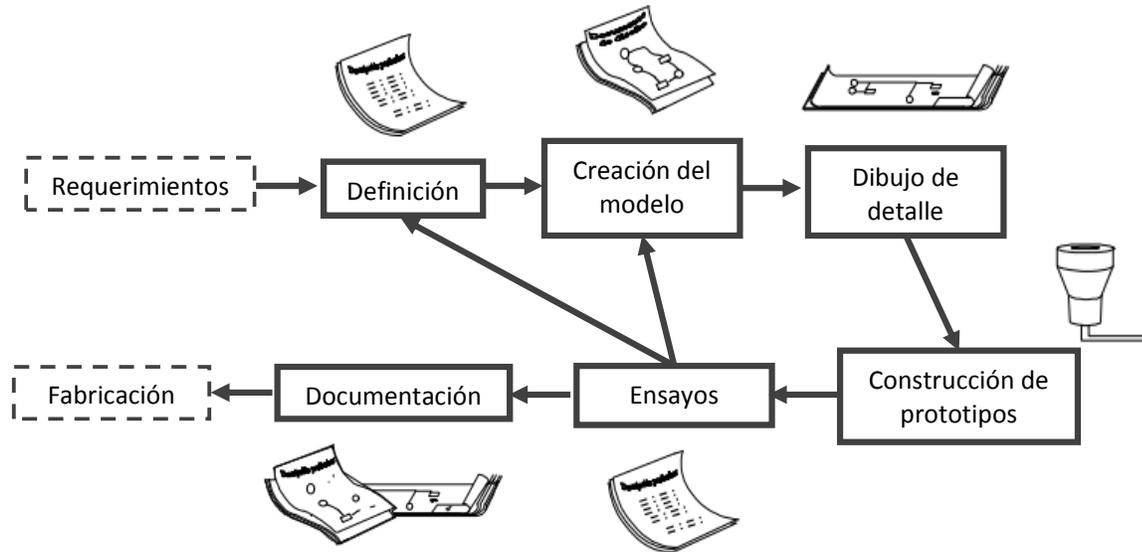


Fig. 1.1. Esquema del proceso de diseño clásico.

1. SISTEMAS CAD

1.1 Definición de sistema CAD

Las siglas **CAD** corresponden al acrónimo de **“Computer Aided Design”** o en español **“Diseño Asistido por Computadora”**. En un sentido amplio podemos entenderlo como la aplicación de la informática al proceso de diseño.

El desarrollo de un sistema CAD se basa en la representación computacional de un modelo que surge a partir de un acto creativo como respuesta a una necesidad o requerimiento. Se trata básicamente de una base de datos de entidades geométricas (puntos, líneas, arcos, etc.) con la que se puede operar a través de una interfaz gráfica.

Permite diseñar en dos o tres dimensiones mediante geometría alámbrica (esto es, puntos, líneas, arcos, splines, o sea curvas definidas a trozos mediante polinomios), superficies y sólidos para obtener un modelo numérico de un objeto o conjunto de ellos. La base de datos asocia a cada entidad una serie de propiedades como color, capa, estilo de línea, nombre, definición geométrica, etc. que permiten manejar la información de forma lógica. Además pueden asociarse a las entidades o conjuntos de estas, otro tipo de propiedades como el coste, material, etc. que permiten enlazar el CAD a los sistemas de gestión y producción.

De los modelos pueden obtenerse planos con cotas y anotaciones para generar la documentación técnica.

El ciclo de diseño utilizando un sistema CAD se ve afectado respecto al proceso clásico por la inclusión de una etapa de simulación entre la creación del modelo y la generación de bocetos. Esta simple modificación supone la creación de un modelo matemático que da lugar a un ahorro importante en la duración del proceso de diseño ya que permite adelantar el momento en que se detectan algunos errores.

En síntesis, el Diseño Asistido por Computadora es el proceso de automatización del diseño que emplea técnicas de gráficos informáticos junto con programas de cálculo y documentación del producto.

El éxito en la utilización de sistemas CAD radica en la reducción de tiempo invertido en los ciclos de exploración, fundamentalmente por el uso de sistemas gráficos interactivos, que permiten realizar las modificaciones en el modelo y observar inmediatamente los cambios producidos en el diseño.

1.2 Tipos de CAD

Para comenzar el análisis y la clasificación de los sistemas CAD podemos distinguir dos tipos:

1. **CAD Analítico:** que usa procedimientos analíticos para definir sus límites o acciones.

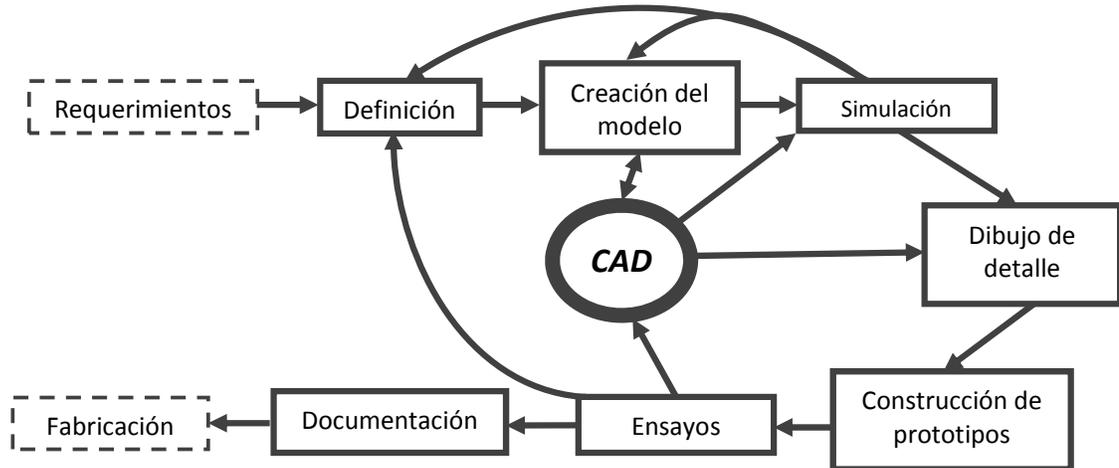


Fig.1.2. Esquema del proceso de diseño a través de soportes CAD.

Los programas de este tipo surgieron después de los primeros métodos gráficos por la necesidad de cuantificar y permitir evaluar los resultados de las variables que involucra el diseño estructural. En estos casos el dibujo o trazado permanece en la memoria de la computadora como una serie de relaciones de puntos-coordenadas, sentido y dirección, en programas vectoriales, o como un grupo de píxeles, en programas de renderizado y tratamiento de imágenes. Cada elemento del dibujo o trazado es definido por sus coordenadas espaciales (x, y, z) mediante el uso de complejos procedimientos analíticos matemáticos (cálculo vectorial, integral, diferencial, algebraico) en los cuales toda la información se maneja de forma Lógica-Analítica.

2. **CAD Paramétrico:** que usa parámetros para definir sus límites o acciones. Difiere básicamente de cualquier otro tradicional en un aspecto clave: la información visual es parte de la información disponible en el banco de datos, o sea, una representación de la información como un objeto en la memoria de la computadora. Cada elemento del dibujo es tratado como un "objeto", que no es definido únicamente por sus coordenadas espaciales (x, y, z) sino que también por sus parámetros, sean gráficos o funcionales. Los bancos de datos relacionales de los objetos son interrogados permitiendo que cualquier cambio ocurrido en una especificación modifique el dibujo en uno o todo el articulado. Como esos bancos de datos pueden incluir informaciones económicas y financieras, son descriptos como 5D verdaderos donde existen las 3 dimensiones espaciales, la cuarta sería el tiempo y la quinta incluiría los costos.

En la actualidad el CAD paramétrico ha substituido casi por completo a las técnicas clásicas de diseño en tres dimensiones mediante el modelado de sólidos y superficies y se ha convertido en un conocimiento imprescindible para cualquier profesional de la ingeniería o la informática técnica.

Otro aspecto importante a remarcar es la diferencia entre los denominados sistemas CAD y CADD:

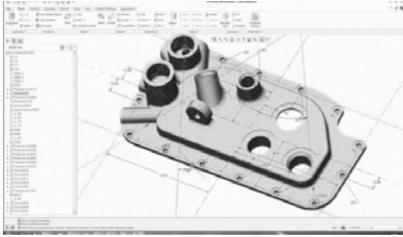


Fig.1.3. Programas de diseño CAD.

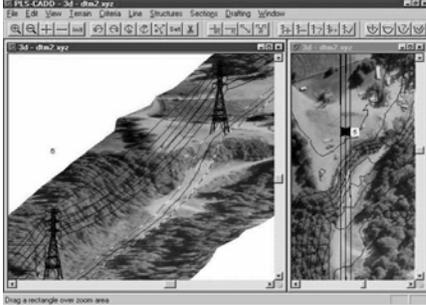


Fig.1.4. Diseño gráfico – Software CADD.

1) **CAD → Programas de diseño de objetos reales** (diseño de piezas, edificios, etc.). Se trata de programas de dibujo vectorial y han de ser muy exactos para poder controlar entidades que se están dibujando y sus interrelaciones ya que los objetos que se construyan estarán basados en los dibujos hechos con este tipo de programas.

2) **CADD → Programas para el diseño gráfico y dibujo** (elaboración de carteles, maquetación, páginas web, etc.). Estos programas se centran principalmente en la imagen, su resolución, las opciones de color, la impresión, resolución en video, etc. No necesitan ser tan exactos como los anteriores y las imágenes suelen almacenarse en forma de mapa de bits.

1.3 CAD 2D/3D

Las herramientas CAD se pueden dividir básicamente en programas de dibujo en dos dimensiones (2D) y modeladores en tres dimensiones (3D).

Las herramientas de dibujo en 2D se basan en entidades geométricas vectoriales como puntos, líneas, arcos y polígonos con las que se puede operar a través de una interfaz gráfica. A partir de estos instrumentos podemos obtener las diferentes vistas del objeto representado (superior, inferior, frontal, lateral) de forma independiente, con una inexistente asociación entre ellas.

Los modeladores en 3D añaden superficies y sólidos dibujándose el objeto completo, obteniéndose una imagen realista, en movimiento y observable desde distintas perspectivas.

El modelado 2D fue el primero en aparecer debido a su sencillez y a los menores recursos que precisa. Una alternativa al 2D fue el $2\frac{1}{2}D$, en el cual se puede expandir la figura en un eje, presentando profundidad en el modelo pero no podemos formarla o verla como en 3D. Sin embargo estas modalidades están sujetas a mayores errores que el modelado en tres dimensiones y están quedando relegadas debido que, a partir de un modelado en 3D, se pueden obtener rápidamente planos en dos dimensiones, pero al revés es imposible.

Por otra parte los sistemas 3D son programas de media o alta gama diseñados para dibujar directamente bajo la interfaz de Windows. Esto permite que el usuario se encuentre en un entorno de trabajo más familiar. Generalmente son muy intuitivos y fáciles de manejar con los que se puede adquirir una alta productividad en un corto espacio de tiempo. SolidWorks es un ejemplo de este tipo de programas.

Los programas de alta gama se diferencian en que poseen opciones y herramientas más potentes y avanzadas de cálculo dado que pueden trabajar con superficies avanzadas y sólidos complejos con opciones que no poseen los programas de gama media.

Las tipologías de modelado geométrico son:

- **Modelado alámbrico:** como se visualiza en la Figura 1.5 sólo contienen elementos que materializan aristas de un objeto. Precisa poca potencia informática pero es la forma más lenta de construir un modelo tridimensional ya que se debe hacer línea a línea. Además presenta dificultad para obtener las propiedades físicas del modelo a transferir a un sistema CNC y existe imprecisión en la representación de superficies curvas.

Se utilizan modelos alámbricos para modelar perfiles, trayectorias, redes, u objetos que no requieran la disponibilidad de propiedades físicas (áreas, volúmenes, masa).

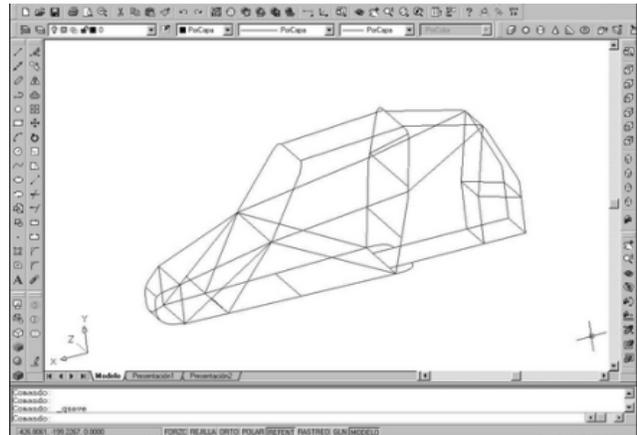


Fig.1.5. Modelado Alámbrico.

- **Modelado de superficies:** con este conjunto de técnicas se consigue mayor precisión geométrica y se logra un mayor realismo aplicando técnicas de sombreado y coloración de superficies (Figura 1.6). Además supera los inconvenientes del modelado alámbrico.

Es el modelado que mayor potencia informática requiere y se necesita de un operador experto.

Los modelos de superficie se utilizan para modelar objetos como carrocerías, fuselajes, zapatos, personajes, donde la parte fundamental del objeto que se está modelando es el exterior del mismo.

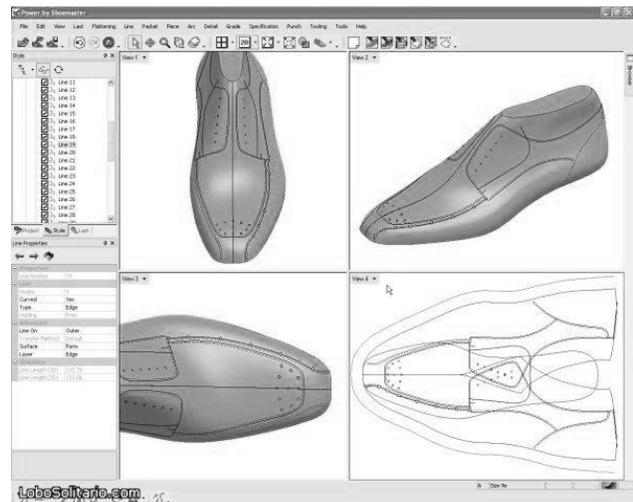


Fig.1.6. Modelado de Superficies.

- **Modelado de sólidos:** se trata de una precisa descripción que incluye no sólo la superficie externa de un objeto sino también la estructura interna. Es el método más sencillo y directo para obtener objetos de geometría compleja, como el ilustrado en la Figura 1.7.

Grupo Diseño, Gestión y Desarrollo de Nuevos Productos

Los modelos sólidos son los que más información contienen y se usan para modelar piezas mecánicas, envases, moldes, y en general, objetos en los que es necesario disponer de información relativa a propiedades físicas como masas, volúmenes, centro de gravedad, momentos de inercia, etc.

En sus inicios las aplicaciones basadas en el modelado sólido no tuvieron demasiada popularidad debido a los inconvenientes de requerir un complejo aparato matemático, un proceso rígido de introducción de datos y, originalmente, una engorrosa interfaz con el usuario.

Con la aparición del diseño paramétrico esta situación cambió. Cuando se dibuja una nueva pieza en el programa de CAD, en lugar de introducir valores numéricos para las entidades gráficas, se les asocia una variable (parámetro) de forma que es posible controlar la geometría de la pieza variando el valor de los diferentes parámetros (diseño variaciones) y es posible establecer relaciones entre ellos, de modo que al modificar uno afecta directamente a las otras entidades relacionadas.

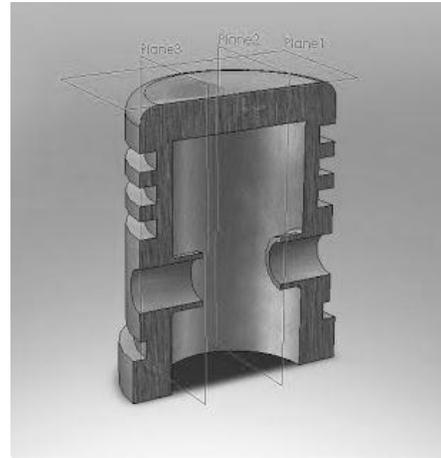


Fig.1.7. Modelado de Sólidos.

1.4 Estrategias de diseño CAD

Podemos hablar de tres estrategias en el diseño CAD. Ellas son:

- **Ascendente**

Se insertan las piezas y los subensamblajes existentes en un archivo de ensamblaje y se colocan los componentes aplicando restricciones de ensamblaje como Coincidencia y Nivelación. Si es posible los componentes deben insertarse en el mismo orden que se utilizaría para ensamblarlos en la fase de fabricación.

A menos que las piezas de los componentes se creen a partir de operaciones adaptativas de los archivos de pieza correspondientes es posible que no se ajusten a los requisitos de un diseño de ensamblaje. Dichas piezas, tras ser insertadas en un montaje, se pueden convertir en adaptativas en ese contexto. Las piezas cambian su tamaño en el diseño actual cuando se restringen sus operaciones respecto a otros componentes.



Fig.1.8. Estrategias de diseño CAD > Ascendente.

Si desea que todas las operaciones subrestringidas se adapten al ubicarlas mediante la aplicación de restricciones de ensamblaje, designe un subensamblaje como adaptativo. Cuando una pieza de este grupo se restrinja respecto a una geometría fija cambiará el tamaño de las operaciones en la medida en que sea necesario.

- **Descendente**

Los diseñadores enumeran los parámetros conocidos y crean un esbozo de ingeniería. El esbozo puede ser un diseño 2D que se desarrolla en todo el proceso de diseño tal como se muestra en la siguiente imagen.

El esbozo también puede ser un diseño 3D creado a partir de un archivo de pieza con varios cuerpos

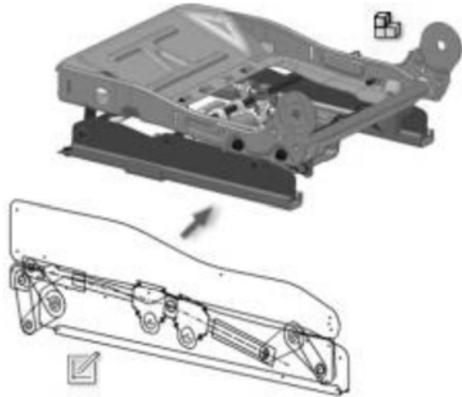


Fig.1.9. Estrategias de diseño CAD > Descendente.

como se muestra en la siguiente imagen. Este método utiliza comandos de modelado de piezas 3D para crear un diseño unificado que controla una única pieza.

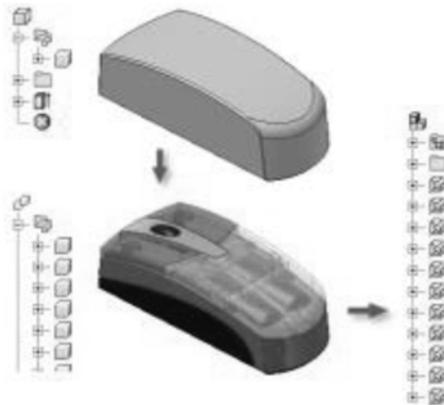


Fig.1.10. Estrategias de diseño CAD > Descendente.

El esbozo puede incluir elementos contextuales como, por ejemplo, las paredes y el suelo donde residirá el ensamblaje, la maquinaria que envía una salida al diseño de ensamblaje o la recibe de él y otros datos fijos. Otros criterios como las características mecánicas también se pueden incluir en el esbozo. Éste se puede dibujar en un archivo de pieza y, a continuación, insertarse en un archivo de ensamblaje. Convierta los bocetos en operaciones a medida que se desarrolla el diseño.

Los componentes diseñados son exclusivos del ensamblaje pertinente pero también se pueden utilizar piezas estándar como tornillos, clavijas o varas. Cambiar una pieza puede ocasionar cambios en otras adyacentes o conectadas a ésta.

El ensamblaje final es una recopilación de piezas interrelacionadas que se han diseñado de forma exclusiva para solucionar el problema de diseño actual.

Grupo Diseño, Gestión y Desarrollo de Nuevos Productos

- **Mixto**

Por lo general se comienza a partir de componentes existentes y se van diseñando otras piezas conforme se requieran. Analice la finalidad del diseño y, a continuación, inserte o cree el componente fijo (base). A medida que se desarrolla el ensamblaje se insertan los componentes existentes o se crean otros nuevos in situ, según sea necesario.

Si es probable que utilice las piezas o los subensamblajes nuevos en otros ensamblajes considere diseñarlos como adaptativos. Para cambiar el tamaño o la posición de algunas operaciones puede dejarlas sin acotar. De este modo se podrá cambiar el tamaño y la forma de la operación cuando se restrinja respecto a otros componentes del ensamblaje. Dado que los cambios realizados en una pieza se guardan en el archivo de pieza, para conservar más de una versión se deben guardar con nombres distintos.

1.5 Estructura de un sistema CAD

El diseño es un proceso iterativo de definición de un ente, por tanto, el desarrollo de un sistema CAD se debe basar en el establecimiento de un ciclo de edición soportado por técnicas de representación del modelo, de edición y de visualización. A un nivel más concreto, un sistema CAD debe realizar las siguientes funciones:

- Definición interactiva del objeto.
- Visualización múltiple.
- Cálculo de propiedades, simulación.
- Modificación del modelo.
- Generación de planos y documentación.
- Conexión con CAM.

Es difícil establecer un modelo universal de sistema de diseño. No obstante, a nivel general y en base a las funciones a desempeñar, se puede establecer que todos deben poseer al menos los siguientes componentes:

- **Modelo.** Es la representación computacional del ente que se está diseñando. Debe contener toda la información necesaria para describir al objeto tanto a nivel geométrico como de características. Es el elemento central del sistema, el resto de los componentes trabajan sobre él. Por tanto determinará las propiedades y limitaciones del sistema CAD.
- **Subsistema de edición.** Permite la creación y edición del modelo bien a nivel geométrico o bien especificando propiedades abstractas del sistema. En cualquier caso la edición debe ser interactiva para facilitar la exploración de posibilidades.
- **Subsistema de visualización.** Se encarga de generar imágenes del modelo. Normalmente interesa poder realizar distintas representaciones del modelo, bien porque exista más de un modo de representar gráficamente el ente que se está diseñando o bien para permitir visualizaciones rápidas durante la edición, junto con imágenes más elaboradas para evaluar el diseño.
- **Subsistema de cálculo.** Permite el cálculo de propiedades del modelo y la realización de simulaciones.

- **Subsistema de documentación.** Se encarga de la generación de la documentación del modelo. Debe ser accesible a todos los departamentos de la empresa implicados en el proceso de diseño.

Indudablemente tanto las técnicas de representación y edición del modelo como la visualización, el cálculo o la documentación, dependen del tipo de ente a modelar. No es posible construir sistemas CAD universales.

1.6 Campos de aplicación

Hay un gran número de aplicaciones que, de uno u otro modo, automatizan parte de un proceso de diseño. Actualmente, para casi cualquier proceso de fabricación o elaboración, se dispone de herramientas informáticas que soportan esta actividad. No obstante los tres campos clásicos de aplicación son la ingeniería civil, el diseño industrial y el diseño de hardware.

Es posible encontrar en el mercado aplicaciones específicas para un campo concreto junto con las de tipo general que básicamente son editores de un modelo geométrico sobre las que se pueden acoplar módulos de simulación o cálculo. La segunda opción es el caso de AUTOCAD, 3D-Studio y MICROSTATION.

El **diseño industrial** es el campo típico de aplicación y en el que se comercializan más aplicaciones. Se utilizan modelos tridimensionales con los que se realizan cálculos y simulaciones mecánicas. La naturaleza de las simulaciones depende del tipo de elemento a diseñar. En el diseño de vehículos es normal simular el comportamiento aerodinámico; en el diseño de piezas mecánicas se puede estudiar su flexión, o la colisión entre dos partes móviles. Entre las aplicaciones comerciales de tipo general cabe destacar CATIA (IBM), I-DEAS (SDRC) y PRO/ENGINEER (PTC).

Las aplicaciones más habituales del CAD/CAM mecánico incluyen:

- Librerías de piezas mecánicas normalizadas.
- Modelado con NURBS y sólidos paramétricos.
- Modelado y simulación de moldes.
- Análisis por elementos finitos.
- Fabricación rápida de prototipos.
- Generación y simulación de programas de control numérico.
- Generación y simulación de programación de robots.

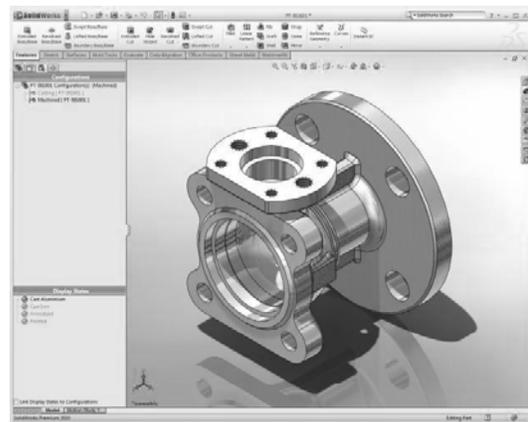


Fig.1.11. Aplicación CAD > Diseño Industrial.

Grupo Diseño, Gestión y Desarrollo de Nuevos Productos

- Planificación de procesos.

En **diseño de hardware** podemos encontrar desde aplicaciones para el diseño de placas de circuitos impresos hasta aplicaciones para el diseño de los mismos, incluyendo circuitos integrados. Las aplicaciones más habituales del CAD relacionado con la Ingeniería Eléctrica y electrónica son:

- Librerías de componentes normalizados.
- Diseño de circuitos integrados.
- Diseño de placas de circuito impreso.
- Diseño de instalaciones eléctricas.
- Análisis, verificación y simulación de los diseños.
- Programación de control numérico para el mecanizado o montaje de placas.

En este último campo es fundamental la realización de simulaciones del comportamiento eléctrico del circuito que se está diseñando.

En **ingeniería civil** podemos encontrar aplicaciones 2D, especialmente en arquitectura, y aplicaciones 3D. Las simulaciones realizadas suelen estar relacionadas con el estudio de la resistencia y la carga del elemento. Las aplicaciones más habituales del CAD relacionado con la arquitectura y la ingeniería civil son:

- Planificación de procesos
- Diseño arquitectónico.
- Diseño de interiores.
- Diseño de obra civil.
- Cálculo de estructuras.
- Mediciones y presupuestos.
- Librerías de elementos de construcción normalizados.

Otro campo interesante donde la tecnología CAD ha tenido un importante desarrollo es en la **geografía y sistemas de información geográfica y cartográfica**.

En este caso se están produciendo avances muy significativos propiciados, entre otros factores, por las posibilidades de conexión que aporta la red Internet. La tendencia apunta hacia un paso de los sistemas 2D hacia sistemas 3D como ha ocurrido antes en otras áreas.

Las aplicaciones más habituales del CAD relacionado con la cartografía y los Sistemas de Información Geográfica (SIG) son:

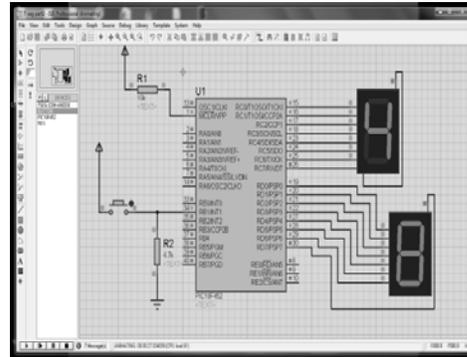


Fig1.12. Aplicación CAD> Electrónica.

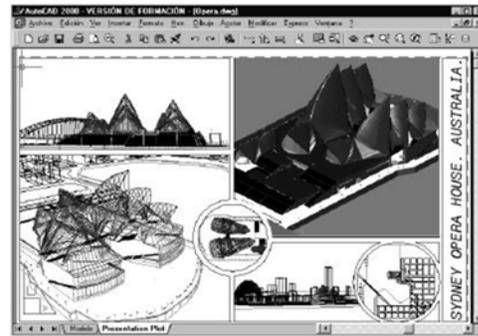


Fig.1.13. Aplicación CAD: Ingeniería Civil.



Fig.1.14. Aplicación CAD: Cartografía.

- Mantenimiento y producción de mapas y datos geográficos.
- Análisis topográfico.
- Estudios medioambientales.
- Catastro.
- Planificación urbana.

1.7 Criterios para la selección y adquisición de un sistema CAD

Actualmente existen una gran variedad de aplicaciones comerciales de CAD de muy diferentes características por lo que, al adquirir una de ellas, es necesario realizar un análisis previo de las necesidades presentes y futuras de la empresa, como prestaciones que ofrece cada producto, atendiendo a las siguientes características y factores:

- **Funcionalidad de la aplicación:** se deberá comprobar si satisface todas las necesidades del equipo multidisciplinar de diseño.
- **Proveedor:** habrá que informarse de su fiabilidad, capacidad de respuesta, garantía, etc.
- **Formación y apoyo,** proporcionados por el suministrador o la compañía matriz. Instalación y mantenimiento del sistema, ayuda en línea, etc.
- **Hardware necesario y compatibilidad con el software** ya instalado.
- **Seguridad.** Posibilidad de establecer varios niveles de acceso a la información.
- **Costos:** de adquisición, de mantenimiento, de formación de personal, de actualización de nuevas versiones, etc.

1.8 Ventajas del CAD

- Ha contribuido a mejorar notablemente la fase de diseño. Se han reducido los costes y tiempos de diseño y también ha disminuido el tiempo de respuesta ante los cambios de producción.
- Es posible utilizar librerías de elementos comunes.
- Se elimina la distinción entre plano original y copia.
- El almacenamiento de los planos es más reducido, fiable (tomando ciertas medidas de seguridad) y permite realizar búsquedas rápidas y precisas mediante bases de datos.
- Aumenta la uniformidad en los planos.
- La calidad de los planos es mayor. No hay tachones, ni líneas más gruesas que otras.
- El tiempo invertido en las modificaciones se reduce enormemente.
- Los datos pueden exportarse a otros programas para obtener cálculos, realizar informes, presentaciones...
- Se puede obtener un modelo en 3D para visualizarlo desde cualquier punto de vista.
- Pueden exportarse los datos a programas de CAE y a máquinas de CNC.
- Obtener simulaciones, animaciones y hacer análisis cinemáticos.
- Facilitan el trabajo en equipo.

1.9 Desventajas del sistema CAD

- Las limitaciones de las funciones de generación de geometría de la aplicación pueden condicionar el diseño y/o limitar la creatividad del diseñador.

Grupo Diseño, Gestión y Desarrollo de Nuevos Productos

- A pesar que se genere un modelo tridimensional del objeto y las representaciones obtenidas sean de buena calidad, tanto la visualización en pantalla como la impresión en papel suponen la visualización bidimensional del objeto.

1.10 Tipos de Archivos CAD y datos interesantes

Si el sistema es 2D tenemos un único tipo de archivo: **.dwg** (drawing).

Por otro lado, todo sistema paramétrico tridimensional maneja tres tipos de archivos:

- **.prt** = parte = modelo
- **.drw** = dibujo = vistas
- **.asm** = ensamblaje (juntar todas las partes de un mismo conjunto)

En algunos casos es necesario trabajar en distintos programas:

- **.dxf** es un sistema de interface para documentos de CAD 2D.
- **.igf** es un sistema de interface para documentos de CAD 3D.



Fig.1.15. Tipos de Archivos CAD.

1.11 AutoCAD

Uno de los sistemas de CAD 2D más utilizados y conocidos es AutoCAD, desarrollado por Autodesk, teniendo su primera aparición en 1982.

Al igual que otros programas de diseño asistido por computadora AutoCAD gestiona una base de datos de entidades geométricas (puntos, líneas, arcos, etc.) con la que se puede operar a través de una pantalla gráfica en la que se muestran éstas, el llamado editor de dibujo. La interacción del usuario se realiza a través de comandos de edición o dibujo y está orientado a la producción de planos empleando para ello los recursos tradicionales de grafismo como color, grosor de líneas y texturas tramadas.

Los comandos y herramientas básicas en el programa son:

- Comandos primarios para comenzar cualquier dibujo:

Tabla 1.1. Comandos generales de dibujo.

COMANDO	ALIAS	BOTÓN	DETALLE
LINE	L		Dibuja rectas consecutivas especificando un punto inicial y los subsiguientes.
CIRCLE	C		Dibuja un círculo especificando su centro y radio (o diámetro).

COMANDO	ALIAS	BOTÓN	DETALLE
ARC	A		Dibuja un arco especificando tres puntos.
RECTANGLE	REC		Dibuja un rectángulo especificando dos esquinas opuestas.
ELLIPSE	EL		Dibuja una elipse especificando un eje (recta) y la distancia al extremo de su otro eje.
POLYGON	POL		Dibuja un polígono regular especificando su número de lados, su centro y un radio (a un vértice o al centro de un lado).
PLINE	PL		Dibuja rectas y arcos consecutivos de la misma forma que el comando LINE dando como resultado un solo objeto de varios segmentos.
HATCH	H		Dibuja un sombreado especificando el área a sombreadar y el tipo de textura en un cuadro de diálogo.

Tabla 1.2. Comandos de Modificación.

COMANDO	ALIAS	BOTÓN	DETALLE
MOVE	M		Mueve objetos seleccionados especificando dos puntos de desplazamiento.
COPY	C		Copia objetos seleccionados especificando dos puntos de desplazamiento.
ERASE	E		Borra los objetos seleccionados.
ARRAY	AR		Copia objetos seleccionados de forma múltiple, especificando parámetros en un cuadro de diálogo.

Grupo Diseño, Gestión y Desarrollo de Nuevos Productos

ROTATE	RO		Gira objetos seleccionados.
STRETCH	S		Modifica objetos moviendo sus vértices.
TRIM	TR		Corta segmentos de objetos a partir de intersecciones.
EXTEND	EX		Extiende una línea hasta otra previamente especificada.
OFFSET	O		Crea objetos que distan la misma longitud del original en todos sus puntos.
MIRROR	M		Crea objetos de forma simétrica al original respecto de un eje "espejo" de dos puntos.
FILLET	F		Redondea un vértice.
CHAMFER	CHA		Recorta un vértice.
EXPLODE	X		Descompone un objeto de múltiples lados en rectas y arcos sencillos
SCALE	SC		Cambia el tamaño de un objeto.

- Comandos de modificación básicos para la administración completa de los dibujos:
- Comandos "SNAP", se emplean con los comandos de dibujo y sirven para lograr mayor precisión.

Tabla 1.3. Comandos SNAP.

COMANDO	ALIAS	BOTÓN	DETALLE
ENDPOINT	END		Acerca el cursor al punto final de una línea.
MIDPOINT	MID		Acerca el cursor al punto medio de una línea.

COMANDO	ALIAS	BOTÓN	DETALLE
NODE	NOD		Acerca el cursor a un punto.
INTERSECTION	INT		Acerca el cursor a una intersección de dos o más líneas.
EXTENSIÓN	EXT		Ubica el cursor sobre la extensión de una línea.
CENTER	CEN		Acerca el cursor al centro de un círculo, de un arco o de una elipse.
QUADRANT	QUA		Acerca el cursor al cuadrante de un círculo, de un arco o de una elipse.
TANGENT	TAN		Acerca el cursor a un punto de tangencia.
INSERTION	INS		Acerca el cursor al punto de inserción de un bloque.
PERPENDICULAR	PER		Acerca el cursor a un punto perpendicular.
NEAREST	NEA		Muestra el punto más cercano al cursor sobre un objeto.

1.12 SolidWorks

Así como hablamos de AutoCAD 2D como un sistema muy conocido y difundido para el diseño en dos dimensiones, cuando tratamos en sistemas 3D uno de los programas más potentes y utilizados el SolidWorks.

SolidWorks es un programa de diseño asistido por computadora para modelado mecánico desarrollado en la actualidad por SolidWorks Corporation, una subsidiaria de Dassault, para el sistema operativo Microsoft Windows. Es un modelador de sólidos paramétrico que fue introducido en el mercado en 1995 para competir con otros programas CAD como Pro/ENGINEER, NX, Solid Edge, CATIA, y Autodesk Mecánica Desktop.

El programa permite modelar piezas, conjuntos y extraer de ellos tantos planos como otro tipo de información necesaria para la producción. Es un programa que funciona con base en las nuevas técnicas de

Grupo Diseño, Gestión y Desarrollo de Nuevos Productos

modelado con sistemas CAD. El proceso consiste en trasvasar la idea mental del diseñador al sistema CAD, "construyendo virtualmente" la pieza o conjunto. Posteriormente todas las extracciones (planos y ficheros de intercambio) se realizan de manera bastante automatizada.

Algunas de los principales grupos de herramientas de este sistema son:

Tabla 1.4. Herramientas de SolidWorks.

COMANDO	BOTÓN	DETALLE
2D A 3D		Ayuda a convertir un dibujo 2D en una pieza 3D.
ALINEAR		Proporciona herramientas para alinear cotas y anotaciones como notas, símbolos de tolerancia geométrica, etc.
ANOTACIONES		Herramientas para agregar notas y símbolos a un documento de pieza, ensamblaje o dibujo.
ENSAMBLAJE		Controla la gestión, el movimiento y la relación de posición de los componentes.
BLOQUES		Controla los bloques en el croquisado.
CURVAS		Crear y utilizar curvas.
COTAS/RELACIONES		Herramientas para acotar y para agregar y eliminar relaciones geométricas.
DIMXPRT		Para colocar cotas y tolerancias en piezas.
DIBUJO		Herramientas para alinear cotas y crear vistas de dibujos.
EXPLOSIONAR CROQUIS		Se pueden agregar líneas de recorrido a croquis de líneas de explosión y croquis 3D de ensamblajes y también agregar quiebres de cota a las líneas de croquis.

COMANDO	BOTÓN	DETALLE
OPERACIONES CIERRE		Crear operaciones de cierre que se utilizan en moldes y productos de chapa metálica.
OPERACIONES		Proporciona herramientas para crear operaciones de modelos. El conjunto de iconos de operaciones es muy amplio.
FORMATEANDO		Insertar una nota o para editar una existente, una nota de globo o un símbolo de revisión.
HERRAMIENTAS DE DISEÑO		Crea un plano de diseño que se utiliza en ensamblajes descendentes para la creación de piezas.
FORMATO DE LÍNEA		Se puede especificar el color, el espesor y el estilo en los dibujos.
MACRO		Controla la grabación, ejecución y edición de las macros.
HERRAMIENTAS DE MOLDE		Crear herramientas de moldes como por ejemplo núcleos, cavidades, etc.
<ul style="list-style-type: none"> • MotionManager : estudios de movimientos. Los subgrupos principales son: 		
Tabla 1.5. Motion Manager		
CAPTURAS RÁPIDAS		Controla las herramientas para la utilización de Capturas rápidas.
GEOMETRÍA DE REFERENCIA		Proporciona herramientas para crear y utilizar geometría de referencia (plano, eje, sist. de ref.).

COMANDO	BOTÓN	DETALLE
CAPTURA DE IMAGEN		Capture imágenes y vídeos de sus modelos para utilizarlos en documentos y presentaciones.
FILTRO DE SELECCIÓN		Ayudan a seleccionar elementos de tipo específico en la zona de gráficos o en la hoja de dibujo.
CHAPA METÁLICA		Herramientas para crear y utilizar piezas de chapa metálica.
CROQUIS		Controla todos los aspectos de la creación de croquis a excepción de las splines y los bloques.
SOLIDWORKS OFFICE		Permite activar cualquier complemento que se incluye en el paquete de SolidWorks Professional o Premium.
HERRAMIENTAS DE SPLINE		Para controlar las propiedades de una spline croquizada.
ESTÁNDAR		Controla la gestión de archivos y la regeneración del modelo.
VISTAS ESTÁNDAR		Orientar la pieza, el ensamblaje o el croquis en una de las vistas estándar preconfiguradas.
SUPERFICIES		Proporciona herramientas para crear y modificar superficies.
TABLA		Crear tablas en documentos.
HERRAMIENTAS		Para medir, definir y analizar las características de los modelos.

COMANDO	BOTÓN	DETALLE
VER		Orientación de vista, estilo de visualización, vista previa, etc.
WEB		Proporciona soporte para trabajar utilizando la Internet.
PIEZAS SOLDADAS		Herramientas para crear piezas soldadas.

1.13 SolidWorks Electrical

SolidWorks Electrical es un software que ofrece la habilidad a ingenieros eléctricos y mecánicos de trabajar juntos y sintonizados, sin problemas, logrando un diseño integrado en menor tiempo y con mayor calidad que reúne las características eléctricas y mecánicas que la pieza demanda.

En principio el software puede ser dividido en dos secciones según las prestaciones que cada una tiene: SolidWorks Electrical y SolidWorks Electrical 3D.

1.13.1 SolidWorks Electrical 2D

Esta sección del programa es utilizado para la creación exclusiva de diagramas en 2D que permiten representar sencillamente, pero de manera muy eficaz y simple, los sistemas de conexión y circuitos eléctricos para sistemas de control y potencia que las piezas mecánicas finales requieran.

Presenta una característica muy importante que permite mejorar el diseño y sus aspectos: varios usuarios pueden trabajar de manera simultánea en el proyecto aportando ideas y mejoras permanentemente.

Entre algunas de las posibilidades que el sistema presenta podemos nombrar:

- La creación de esquemas unifilares para sistemas eléctricos contando con una gran variedad de elementos y componentes necesarios.

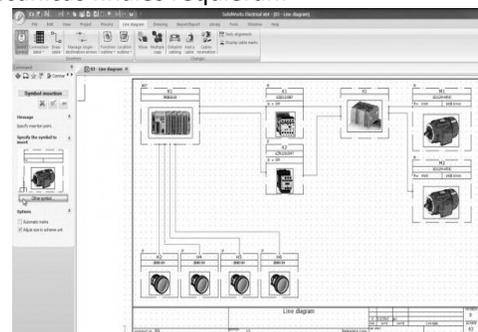


Fig.1.16. SolidWorks Electrical.

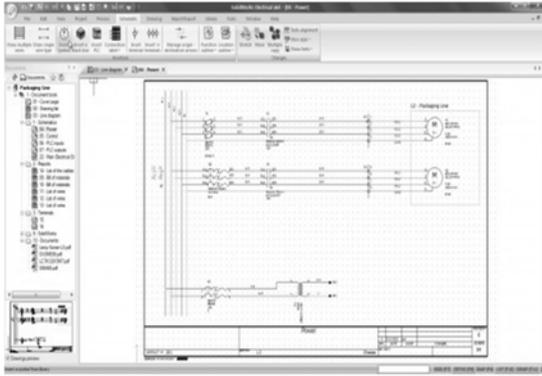


Fig.1.17. SW Electrical 2D.

- Creación de diagramas de líneas múltiples para circuitos de potencia y control de maquinarias y circuitos neumáticos e hidráulicos
- Documentación acerca de entradas y salidas de PLC.
- Posibilidad de generar listas de materiales y cables necesarios.
- La incorporación de información perteneciente a los componentes usados en el diseño y la opción de insertar instrucciones e indicaciones de fabricación.

1.13.2 SolidWorks Electrical 3D



Fig.1.18. SW Electrical 3D.

Luego de la etapa de diseño de esquemas y diagramas en 2D, SolidWorks Electrical 3D permite acceder a toda la información obtenida y compilada por el usuario para que éste la utilice y logre la integración entre los sistemas eléctricos y mecánicos en el diseño final.

Básicamente el sistema toma la información que proviene de los esquemas en 2D realizados con SolidWorks Electrical y permite incorporarlos en el modelo mecánico de la pieza o gabinete importado desde

SolidWorks para luego realizar los cableados pertinentes entre los distintos componentes. De este modo obtenemos una representación tridimensional y fiel de la pieza diseñada y sus conexiones.

Un punto muy importante que hace poderosa a esta herramienta es la sincronización en tiempo real entre los diseños 2D y 3D lo que contribuye a la sincronización del diseño electromecánico de forma que el proyecto permanezca actualizado en todas las etapas del diseño y desarrollo simplificando procesos de rediseño.

1.13.3 Ventajas y cualidades

Este nuevo programa tiene una serie de ventajas que lo hacen interesante y poderoso en la industria:

- **Eliminación de los costes ocultos.** Evita la aparición de errores o gastos extraordinarios, gracias a la vinculación, además de disponer de una lista de materiales única para ambos modelos (eléctrico y mecánico).
- **Reducción de los defectos de fabricación y desechos.** Al poder seleccionar los elementos durante la creación del esquema que posteriormente se agregará al modelo 3D, podrá garantizar un mayor ajuste, comprobar la existencia de colisiones, calcular longitudes, planificar un uso de materiales eficiente y reducir el número de diseños desechados.
- **Mejora en el tiempo de comercialización.** La coordinación de las funciones eléctricas y mecánicas permite que ambos equipos trabajen simultáneamente, lo que implica un ahorro de tiempo.

- **Fases de ensamblaje y fabricación coherentes entre sí.** La inclusión de la información eléctrica del esquema en el modelo 3D permite la planificación detallada, documentación y visualización del diseño del producto en su conjunto para garantizar la uniformidad en el ensamblaje de una unidad a otra.
- **Optimización del desarrollo para reducir costes.** Diseño más rápido, mejora en las comunicaciones entre departamentos, sincronización de planes, documentación actualizada, reducción del tiempo de comercialización... Todo son ventajas que, en conjunto, permiten reducir los costes a lo largo de todo el ciclo de vida del producto.

CAPITULO II

ECODISEÑO



2. ECODISEÑO



Fig.2.1.Simbología del diseño sustentable.

2.1 Definición

En ecología **sostenibilidad** describe cómo los sistemas biológicos se mantienen diversos y productivos con el transcurso del tiempo. Se refiere al equilibrio de una especie con los recursos de su entorno. Por extensión se aplica a la explotación de un recurso por debajo del límite de renovación del mismo. Desde la perspectiva de la prosperidad humana y según el Informe Brundtland de 1987 la sostenibilidad consiste en satisfacer las necesidades de la actual generación sin sacrificar la capacidad de futuras generaciones de satisfacer sus propias necesidades.

Un ejemplo típico es el uso de la madera proveniente de un bosque: si la tala es excesiva el bosque desaparece; si se usa la madera por debajo de un cierto límite siempre hay madera disponible. En el último caso la explotación del bosque es sostenible o sustentable. Otros ejemplos de recursos que pueden ser sostenibles o dejar de serlo, dependiendo en su tasa de explotación, son el agua, el suelo fértil o la pesca.

La sustentabilidad para una sociedad significa la existencia de condiciones económicas, ecológicas, sociales y políticas que permitan su funcionamiento en forma armónica en el tiempo y en el espacio. En el tiempo la armonía debe darse entre esta generación y las venideras; en el espacio la armonía debe darse entre los diferentes sectores sociales, entre mujeres y hombres y entre la población con su ambiente.

No puede haber sustentabilidad en una sociedad cuando la riqueza de un sector se logra a costa de la pobreza de otro, o cuando unos grupos reprimen a otros, o cuando se están destruyendo o terminando los bienes de la naturaleza, o cuando el hombre ejerce diversos grados de explotación, violencia y marginación contra la mujer. Tampoco podrá haber sustentabilidad en un mundo que tenga comunidades, países o regiones que no son sustentables. La sustentabilidad debe ser global, regional, local e individual y en el campo ecológico, económico, social y político.

A veces se usan indistintamente conceptos como sostenible y sustentable aunque su significado no sea el mismo. Sostenible viene de sostener y sustentable de sustentar. Las cosas se sostienen desde afuera pero se sustentan desde adentro. Mientras la sostenibilidad se podría lograr con acciones decididas desde afuera, la sustentabilidad requiere que las acciones se decidan desde adentro, en forma autónoma. Además lo que interesa hacer sustentable es la sociedad, no necesariamente el llamado desarrollo.



Fig.2.2. Ecodiseño.



Fig.2.3. Concepto gráfico de sustentabilidad.

2.2 Factores de impacto medioambiental

Lluvia ácida, contaminación del agua, calentamiento global, muerte de animales, plantas y peces, y la lista continúa. La calibración exacta de nuestro impacto en el entorno sólo ha adquirido protagonismo en las dos últimas décadas. El diseño sostenible observa el impacto del desarrollo de su producto, desde el inicio hasta el final, en cuatro factores medioambientales fundamentales: acidificación del aire, huella de carbono, cantidad total de energía consumida y eutrofización del agua. La medición de este impacto le ayudará a crear diseños mejores para el medioambiente.

- **Acidificación del aire:** la combustión de combustibles genera óxido de azufre, óxido nítrico y otras emisiones ácidas al aire. Esto provoca un aumento del ácido en el agua de la lluvia, lo que ocasiona a su vez más ácidos en los lagos y el suelo. Estos ácidos pueden convertir en tóxicos la tierra y el agua para las plantas y la vida acuática. La lluvia ácida también puede disolver materiales sintéticos como el hormigón. Este impacto se suele medir en kg de equivalentes de dióxido de azufre (SO_2).



Fig.2.4. Emisiones ácidas.

- **Huella de carbono:** el dióxido de carbono y otros gases que resultan de la quema de combustibles fósiles se acumulan en la atmósfera y provocan un aumento de la temperatura media de la tierra. También conocido como potencial de calentamiento global (GWP), la huella de carbono se mide en unidades equivalentes de dióxido de carbono (CO_2). Los científicos y los políticos, entre otros, consideran que el calentamiento global es el responsable de problemas como la desaparición de los glaciares, la extinción de especies, las temperaturas más extremas, entre otros.



Fig.2.5. Huella de carbono.

- **Cantidad total de energía consumida:** ésta es una medida de las fuentes de energía no renovables asociadas con el ciclo de vida de la pieza en megajulios (MJ). Este impacto no sólo incluye la electricidad o los combustibles utilizados durante el ciclo de vida del producto sino también la corriente de energía necesaria para obtener y procesar estos combustibles y la energía gris que se liberaría de los materiales en la fase de incineración. La cantidad total de energía consumida se expresa como valor calorífico neto de la demanda de energía de recursos no renovables (por ejemplo petróleo, gas natural, etc.). Se tienen en cuenta también factores como las eficiencias en la conversión de la energía (por ejemplo potencia, calor, vapor, etc.).



Fig.2.6. Consumo de energía.

- **Eutrofización del agua:** cuando se añade una cantidad excesiva de nutrientes a un ecosistema acuático se produce la eutrofización. El nitrógeno y el fósforo procedentes de aguas residuales y fertilizantes agrícolas dan lugar al excesivo crecimiento de algas que consumen el oxígeno del agua y provocan la muerte de las plantas y los animales del medio acuático. Este impacto se suele medir en kg de equivalentes de fosfato (PO_4) o en kg de equivalentes de nitrógeno (N).



Fig.2.7. Eutrofización del agua.

2.3 Características de un producto sustentable

Para que un producto sea sustentable es necesario que cumpla con una serie de características que tiendan a respetar el ambiente y disminuir el impacto sobre el mismo. Los productos sustentables permiten:

- Sustituir productos tradicionales que tienen un mayor impacto ambiental o consumo de energía.
- Evitar la utilización de sustancias, productos y procesos agresivos con el medio ambiente.
- Manejar correctamente las materias primas utilizando de manera óptima los recursos naturales.
- Contribuir a reducir el problema ambiental.
- Incentivar a procesos sociales justos.

2.4 La relatividad del diseño sostenible

El concepto de producto “sostenible” o “ecológico” en sí no existe sino que solamente se puede hablar de un producto más sostenible o más ecológico. De hecho el concepto de producto ecológico consistiría en no fabricarlo porque la solución más sostenible es evitar la producción de elementos innecesarios en su conjunto.

Para esos productos que hemos decidido que son necesarios debemos tener en cuenta que todo tiene impactos de un modo u otro. El objetivo fundamental del diseño sostenible consiste en buscar formas de reducirlos para, en última instancia, encontrar una solución más sostenible.

2.5 Las tres opciones de la evaluación medioambiental¹

La sostenibilidad de los productos no es únicamente relativa sino multidimensional. Es decir, no existe un único indicador universal de sostenibilidad (ni siquiera el carbono). Las métricas y las dimensiones de impacto adecuadas en base a las que se comparan los productos pueden diferir considerablemente en función del objetivo de la evaluación. La medición del impacto crea el panel clave de diseño sostenible y, por tanto, es importante elegir un enfoque de evaluación que genere información coherente con el uso deseado.

La técnica apropiada para la evaluación del impacto medioambiental de un diseño depende de las respuestas que se obtengan a las tres preguntas siguientes:

- 1. ¿Qué impactos le preocupan?** ¿La toxicidad es importante? ¿Se utiliza agua? ¿Sólo equivalentes de CO₂?
- 2. ¿Cuál es el alcance de la evaluación?** ¿Adónde llega la cadena de suministro? ¿Qué parte del ciclo de vida del producto debe reflejar? ¿Cuál es la unidad de análisis para la evaluación? ¿Se trata de un componente, un ensamblaje, un producto o un sistema?
- 3. ¿Qué clase de métricas son adecuadas para sus fines?** ¿Para qué se utilizará la información de evaluación y quién la utilizará? ¿Se precisan detalles rigurosos o una “idea aproximada” es suficiente?

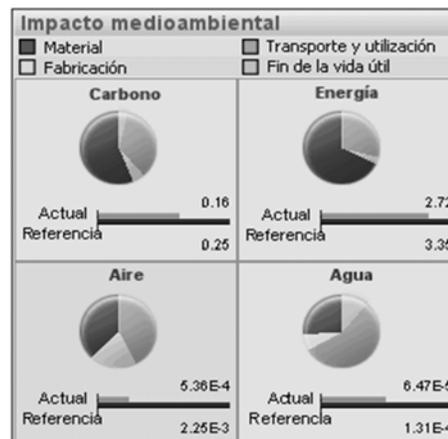


Fig.2.8. Medición del impacto medioambiental.

2.6 ¿Qué comparo?

Los diseñadores que desean reducir el impacto medioambiental de los productos deben disponer de algún modo para evaluar en qué difieren las decisiones que toman. El único modo de evaluar si un diseño es más sostenible consiste en comparar sus impactos con otras opciones, como por ejemplo un diseño alternativo, una versión anterior, un punto de referencia o un objetivo de impacto.

Cuando se trata de determinar el impacto medioambiental es importante especificar una unidad de análisis. Las comparaciones relativas sólo funcionan si tienen una base en común. En ocasiones puede resultar bastante sencillo, por ejemplo en el caso de dos generaciones del mismo diseño o cuando se trata

¹ Ver ANEXO B: “Ejemplos de Ecodiseño”

de una simple sustitución del material. Sin embargo en la mayoría de situaciones de rediseño se debe especificar “una unidad de producto” común para el análisis.

Un modo habitual de hacerlo consiste en identificar una unidad funcional. Para comparar dos sistemas de productos distintos se debe elegir una métrica de la operación que sea coherente con ambos. Por ejemplo para un productor de café podría ser la preparación de una bebida, para un detergente podrían ser los ciclos de lavado y para una pintura podría ser la protección de la superficie con el paso del tiempo. De ese modo es posible evaluar el impacto de varias formas de realizar una operación específica sin limitación de diferencias en las formas de los diseños.

2.7 Evaluación de ciclo de vida (LCA)

La LCA, o evaluación de ciclo de vida, es un análisis detallado que proporciona la información necesaria para tomar las decisiones más respetuosas con el medioambiente a lo largo del proceso de diseño del producto. El análisis valora la vida completa de un producto desde la extracción del mineral, asando



Fig.2.9. Representación del ciclo de vida (LCA) de un producto sustentable.

por la producción de materiales, la fabricación, el uso del producto, su eliminación y todos los transportes que conlleva cada fase.

2.7.1 Extracción de materias primas

Esto incluye la energía y los demás recursos que se utilizan para la adquisición de los materiales de base que se utilizan en el producto, tanto a través de la extracción de minerales, la recolección de madera, la extracción de petróleo, etc. Esta etapa puede incluir la recolección de materiales procedentes de fuentes recicladas si adoptan la forma de materias primas.

2.7.2 Procesamiento de materiales

Durante esta etapa las materias primas se convierten en formas utilizadas para la fabricación. Cubre los procesos necesarios para producir acero, cobre, materia prima para plástico, papel, gasolina y similares.

2.7.3 Fabricación de piezas

Esta etapa cubre la fabricación de piezas únicas o, como mínimo, simples. Los procesos comunes incluyen el moldeo por inyección, el troquelado de metales así como el mecanizado, el soldado por pasadas anchas y el fresado.

2.7.4 Ensamblaje

En muchos casos los productos se deben ensamblar con procesos que van más allá de la creación de componentes individuales. Puesto que suele ser la primera etapa que reúne una gama dispar de materiales (un asa de plástico y un contenedor metálico) las evaluaciones del impacto medioambiental aumentan considerablemente su complejidad.

2.7.5 Uso del producto

En esta etapa se incluye cualquier uso de energía, generación de emisiones o afectación directa de otros recursos por parte del producto durante su uso actual. Eso incluye los residuos que se generan en el contexto de uso de un producto tales como el embalaje desechable.

2.7.6 Fin de la vida útil

Cuando un producto deja de utilizarse es que ha llegado al fin de su vida útil. Eso suele significar que el producto no se puede utilizar más aunque hay muchos ejemplos de fin de vida útil que llegan antes del fin de la capacidad de uso (los vasos de papel). Esta etapa se suele subdividir en tres flujos resultantes: la fracción de un producto que se envía al vertedero, se incinera y se reutiliza o recicla.

2.7.7 Transporte

El transporte no se suele considerar una etapa del ciclo de vida puesto que en realidad tienen lugar entre cada una de ellas. Sin embargo se trata de una consideración importante que cabe tener en cuenta en relación con los impactos del ciclo de vida del producto. El transporte se puede incluir entre las etapas en función de dónde tenga lugar (es decir, el envío de materias primas a centros de procesamiento se podría considerar una parte de la etapa de procesamiento). En algunos ejemplos el transporte parece un componente separado del ciclo de vida, especialmente entre el ensamblaje y el uso del producto en el caso de los productos de consumo, puesto que hay varias paradas a lo largo del camino (el mayorista, el

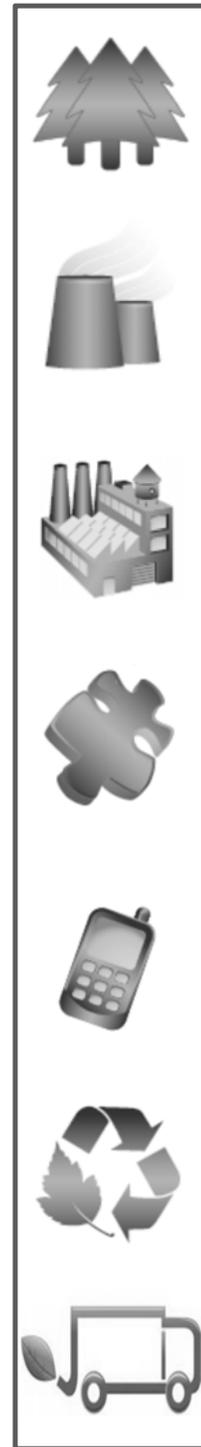


Fig.2.10. Elementos del LCA.

minorista y la entrega). No importa cómo se gestione porque lo importante es garantizar que el transporte avance.

2.8 Interpretación de los resultados

Las secciones anteriores han establecido el contexto de sostenibilidad y han descrito cómo identificarlo. No obstante toda esa información es irrelevante si no permite emprender acciones, es decir, el punto de evaluar y generar informes de impactos medioambientales consiste en proporcionarle información sobre la influencia que las opciones de diseño tienen en la sostenibilidad relativa de un producto en comparación con otras opciones. La presente y las siguientes secciones muestran cómo poner en práctica esa información.

El primer paso consiste en determinar qué significan los resultados de las evaluaciones de impacto medioambiental. Con independencia de las herramientas y técnicas que utilice debe disponer de información de impacto sobre el producto. Tal como hemos destacado anteriormente el diseño sostenible es un concepto relativo por lo que también debe disponer de información de impacto con la que compararlo. Las comparaciones habituales incluyen:

- **Estándares:** Se puede tratar de umbrales o perfiles de impacto determinados que han sido aceptados por la industria o, incluso, simplemente estándares empresariales.
- **Diseños anteriores:** El objetivo podría consistir en que cada generación de un producto sea más sostenible que la anterior.
- **Productos de la competencia:** Tanto en el caso de los fines de posicionamiento en el mercado como internos, en ocasiones resulta útil realizar comparaciones con soluciones de otras empresas.
- **Diseños alternativos:** Uno de los más habituales es comparar variaciones de un diseño determinado con todas las demás para restringir el desarrollo a las opciones de diseño más sostenibles y óptimas.

El conjunto de comparación se debería haber identificado durante la etapa inicial del proceso para poder recopilar la información de impacto relevante sobre los diseños alternativos como parte del proceso global.

Al llevar a cabo las comparaciones es importante conocer las diferencias más significativas. La importancia de las diferencias identificadas dependerá del enfoque utilizado en los productos y las mediciones. Incluso en el caso de las técnicas más basadas en datos no merece la pena investigar todas las mejoras incrementales. Como regla general:

- Una diferencia de +/- 10 % en uno o varios indicadores medioambientales significa que los cambios entre las opciones se pueden considerar “direccionalmente” correctas. Es posible que avance en la dirección correcta.
- En el caso de un producto relativamente simple una diferencia de +/- 30 % en el indicador o indicadores suele indicar un producto considerablemente más ecológico.
- En el caso de productos más complejos la reducción del impacto necesaria para identificar un producto más ecológico es superior, quizá de un +/- 40 o 50 %, porque las probabilidades de obviar pasos del proceso o de modelar incorrectamente algunas suposiciones aumentan con la complejidad del producto.

Grupo Diseño, Gestión y Desarrollo de Nuevos Productos

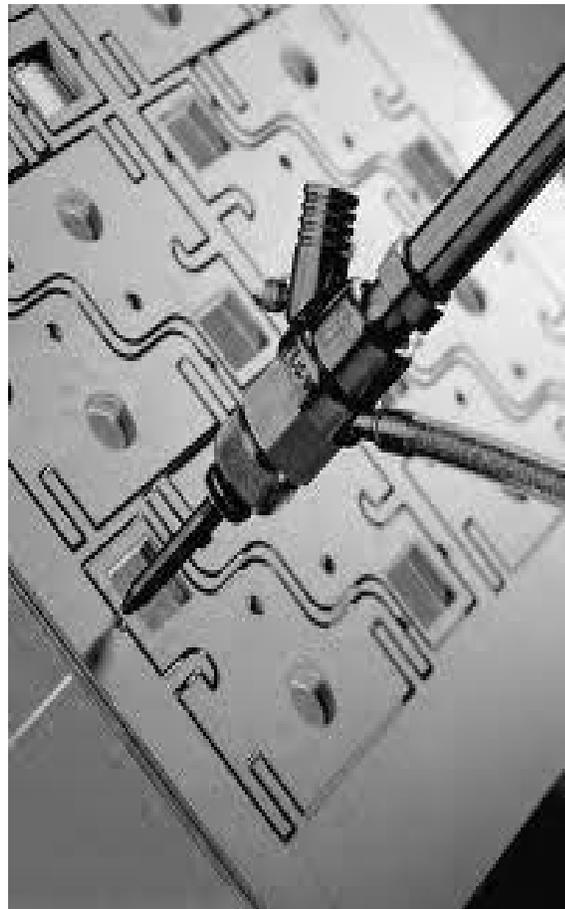
Aunque pueden parecer porcentajes elevados pueden servir como aviso útil para no quedar bloqueado intentando ajustar aspectos menos relevantes de un producto y, en su lugar, centrarse en los contribuyentes principales a sus impactos. Eso resulta especialmente cierto cuando el diseñador debe equilibrar de forma simultánea los impactos medioambientales de un producto con los costes, la durabilidad y otros criterios de diseño, junto con el modo en el que se ajusta en la estrategia global del producto.

Cuando se tiene una idea de qué áreas de impacto merece la pena analizar, tanto por la importancia de las diferencias en relación con alternativas como por otros motivos (tal como la focalización corporativa en la huella de carbono) es momento de buscar formas para reducir esos impactos de la forma más eficaz posible.

En muchos casos existen ciertos elementos del diseño o del ciclo de vida del producto que generan la mayor parte del impacto. Un ejemplo clásico de ello suele ser la regla de 80/20, según la que un 20 % del diseño contribuye a un 80 % del impacto. Así pues, si se reduce el impacto de una cafetera eléctrica, se podría tener la tentación de remodelar el alojamiento de plástico puesto que ese material se suele considerar un material menos sostenible. Sin embargo la simple reducción del cable eléctrico disminuye varias veces el impacto global que se ahorra al reemplazar el asa y, por tanto, la reducción del uso de energía incluso podría hacer que ese impacto parezca insignificante.

CAPITULO III

Sistemas CAM



3. SISTEMAS CAM

3.1 Definición de sistemas CAM

Las siglas **CAM** corresponden al acrónimo de “**Computer Aided Manufacturing**”, traducido al español: “**Fabricación asistida por Computadora**”.

La ingeniería CAM hace referencia concretamente a aquellos sistemas informáticos que ayudan a generar los programas de Control Numérico necesarios para fabricar las piezas en máquinas con CNC. A partir de la información de la geometría de la pieza, del tipo de operación deseada, de la herramienta escogida y de las condiciones de corte definidas el sistema calcula las trayectorias de la herramienta para conseguir el mecanizado correcto y, a través de un postprocesado, genera los correspondientes programas de control numérico con la codificación específica del CNC donde se ejecutarán.

En general la información geométrica de la pieza proviene de un sistema CAD que puede estar o no integrado con el sistema CAM. Algunos sistemas CAM permiten introducir la información geométrica de la pieza partiendo de una nube de puntos correspondientes a la superficie de la pieza obtenidos mediante un proceso de digitalizado previo. La calidad de las superficies mecanizadas depende de la densidad de puntos digitalizados. Si bien este método acorta el tiempo necesario para fabricar el prototipo en principio no permite el rediseño de la pieza inicial.

La utilización más inmediata del CAM en un proceso de ingeniería inversa es para obtener prototipos los cuales se utilizan básicamente para verificar la bondad de las superficies creadas cuando éstas son críticas. Desde el punto de vista de la ingeniería concurrente es posible, por ejemplo, empezar el diseño y fabricación de parte del molde simultáneamente al diseño de la pieza que se quiere obtener con él partiendo de la superficie externa de la pieza mientras aún se está diseñando la parte interna de la misma.

3.2 Tecnología CNC

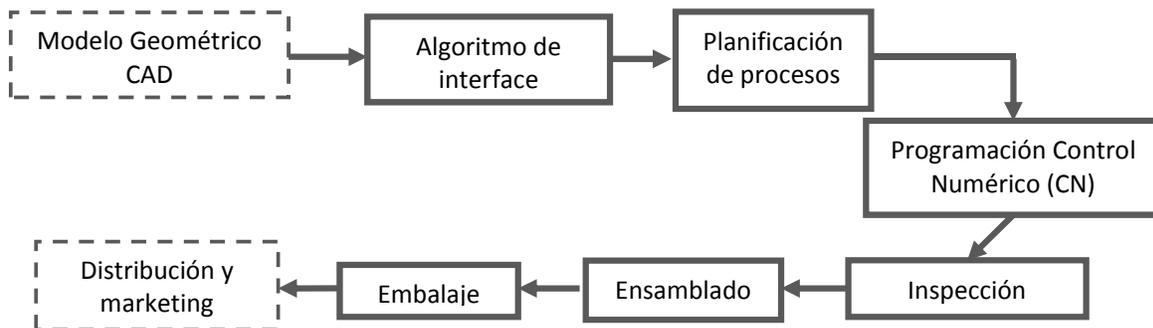


Fig.3.1. Esquema del proceso de trabajo de un sistema CAM (Fabricación Asistida por Computador).

Como ya dijimos el sistema CAM calcula las trayectorias de la herramienta para conseguir el mecanizado correcto y, a través de un postprocesado, generar los correspondientes programas de control numérico con la codificación específica del CNC donde se ejecutarán. Pero... ¿Qué significa exactamente la tecnología CN y CNC?

3.2.1 Concepto de Control Numérico y CNC.

El control numérico se puede definir, de una forma genérica, como un dispositivo de automatización de una máquina que mediante una serie de instrucciones codificadas (el programa) controla su funcionamiento.

Cada programa establece un determinado proceso a realizar por la máquina con lo que una misma máquina puede efectuar automáticamente procesos distintos sin más que sustituir su programa de trabajo. Permite, por tanto, una elevada flexibilidad de funcionamiento con respecto a los equipamientos automáticos convencionales en que los automatismos se conseguían mediante sistemas mecánicos o eléctricos difíciles y a veces casi imposibles de modificar.

Los elementos básicos del control numérico son:

- 1) **El programa** que contiene toda la información de las acciones a ejecutar.
- 2) **El control numérico** que interpreta estas instrucciones, las convierte en las señales correspondientes para los órganos de accionamiento de la máquina y comprueba los resultados.
- 3) **La máquina** que ejecuta las operaciones previstas.

A medida que el progreso de la microelectrónica y la informática se aplica a los controladores numéricos se potencian extraordinariamente las funciones que permiten desarrollar simplificando, a la vez, los procedimientos de programación y operación de las máquinas de tal manera que los CNC – “Control Numérico con Computadora” - que se construyen hoy día sólo conservan de los primitivos CN los principios básicos de funcionamiento.

Paralelamente las máquinas herramienta han ido evolucionando hacia la incorporación en una sola máquina de varias operaciones elementales de mecanizado que tradicionalmente se efectuaban en mecanismos diferentes y hacia la incorporación de cambiadores automáticos de piezas y herramientas apareciendo los centros de mecanizado que permiten obtener una pieza acabada, o casi acabada, en una sola estación de trabajo.

En función de las capacidades de proceso y de memoria de los CNC han evolucionado también las técnicas y lenguajes de programación. Desde los primeros programas lineales en lenguaje máquina a la programación asistida por ordenador, CAM, existe un amplio espectro de sistemas y lenguajes de programación.

3.2.2 Maquinaria

El control numérico se monta sobre todo tipo de máquina herramienta convencional, tanto de arranque de viruta como de trazado y deformación. Sin embargo el control numérico ha promocionado el desarrollo de dos tipos de máquinas múltiples:

- El **centro de mecanizado** en el que sobre pieza fija una o más torretas con herramientas giratorias permiten efectuar operaciones de fresado, taladrado, mandrilado, escariado, etc. Si lleva incorporada mesa giratoria pueden efectuarse operaciones de torno vertical.
- El **centro de torneado**, dotado de una o más torretas, con herramientas motorizadas que además de las clásicas operaciones de torneado permiten efectuar fresados, taladrados, escariados, etc. tanto axiales como radiales.

Las características de precisión exigidas en estas máquinas en condiciones duras de utilización han modificado las características de diseño de las mismas. En el aspecto estructural se busca una mayor rigidez

y ausencia de vibraciones, lo que lleva a la utilización de bastidores de chapa soldada y de hormigón en vez de la clásica fundición. Las máquinas más comunes a las que se les acopla al sistema CNC son:

Tabla 3.1. Ejemplo de maquinarias a las que corrientemente se las asocia con sistemas CNC.

Tecnología	Descripción general
<p style="text-align: center;">Torno</p> 	<p>Es una máquina que trabaja en el plano porque solo tiene dos ejes de trabajo normalmente denominados Z y X. La herramienta de corte va montada sobre unas grúas o rieles paralelos al eje de giro de la pieza que se tornea llamado eje Z; sobre este carro hay otro que se mueve según el eje X en dirección radial a la pieza que se tornea y puede haber un tercer carro llamado charriot que se puede inclinar para hacer conos y donde se apoya la torreta portaherramientas.</p> <p>Los tornos copiadores, automáticos y de control numérico llevan sistemas que permiten trabajar a los dos carros de forma simultánea consiguiendo cilindrados cónicos y esféricos.</p>
<p style="text-align: center;">Fresadora</p> 	<p>Es una máquina herramienta utilizada para realizar mecanizados por arranque de viruta mediante el movimiento de una herramienta rotativa de varios filos de corte denominada fresa. En las fresadoras tradicionales la pieza se desplaza acercando las zonas a mecanizar a la herramienta permitiendo obtener formas diversas, desde superficies planas a otras más complejas.</p> <p>Existen varios lenguajes de programación CNC para fresadoras, todos ellos de programación numérica. Para desarrollar un programa de CNC habitualmente se utilizan simuladores que, mediante la utilización de una computadora, permiten comprobar la secuencia de operaciones programadas.</p>
<p style="text-align: center;">Corte por chorro de agua</p> 	<p>El dispositivo consiste en un chorro de agua a presión cuyo diámetro de boquilla oscila entre 0,08 mm a 0,45 mm de diámetro por el cual sale una mezcla de agua y abrasivo lanzado a una presión muy elevada y capaz de cortar cualquier tipo de material desde metálicos hasta blandos como un pastel.</p> <p>La máquina está dotada de una balsa donde se proyecta el chorro de agua la cual sujeta las piezas mediante una reja manteniendo el material en la superficie de trabajo pero que permite que la mezcla de agua y el material eliminado se deposite dentro de la misma evitando así que el líquido proyectado caiga fuera de la zona de corte e incluso que salpique pudiéndose reciclar el abrasivo para ser reutilizado de nuevo.</p> <p>Además se debe contar con una PC con un sistema CAD para realizar el diseño de la pieza y centro logístico, CAM, donde se reciben las</p>

Tecnología	Descripción general
	órdenes del PC y donde se ejecuta la orden de trabajo directamente sobre la máquina de corte por agua.
<p data-bbox="293 512 396 537">Oxicorte</p> 	<p data-bbox="508 338 1274 485">El oxicorte es una técnica auxiliar a la soldadura que se utiliza para la preparación de los bordes de las piezas a soldar cuando son de espesor considerable y para realizar el corte de chapas, barras de acero al carbono de baja aleación u otros elementos ferrosos.</p> <p data-bbox="508 510 1274 657">Consta de dos etapas: en la primera el acero se calienta a alta temperatura (900 °C) con la llama producida por el oxígeno y un gas combustible; en la segunda una corriente de oxígeno corta el metal y elimina los óxidos de hierro producidos.</p> <p data-bbox="508 682 1274 863">En este proceso se utiliza un gas combustible cualquiera (acetileno, hidrógeno, propano, hulla, tetreno o crileno) cuyo efecto es producir una llama para calentar el material mientras que como gas comburente siempre ha de utilizarse oxígeno a fin de causar la oxidación necesaria para el proceso de corte.</p> <p data-bbox="508 888 1274 951">Para realizar el trabajo de corte se programa y se carga al sistema CAM que lo ejecuta.</p>
<p data-bbox="215 1121 477 1146">Electroerosión por hilo</p> 	<p data-bbox="508 989 1274 1178">La electroerosión de hilo es un proceso de fabricación que consiste en la generación de un arco eléctrico entre una pieza y un electrodo (hilo de bronce o zinc) en un medio dieléctrico para arrancar partículas de la pieza hasta conseguir reproducir en ella las formas deseadas.</p> <p data-bbox="508 1203 1274 1308">Ambos materiales, pieza y electrodo, deben ser conductores para que pueda establecerse el arco eléctrico que provoque el arranque de material.</p> <p data-bbox="508 1333 1274 1438">En este proceso al hilo delgado (Diámetro 0.25 mm) que está sujeto por sus extremos se le hace circular una corriente y mediante un movimiento rectilíneo se obtiene la geometría deseada.</p> <p data-bbox="508 1463 1274 1526">Estos sistemas utilizan programas CAD/CAM para la realización de las piezas.</p>
<p data-bbox="248 1604 444 1629">Corte por plasma</p> 	<p data-bbox="508 1566 1274 1755">El fundamento del corte por plasma se basa en elevar la temperatura del material a cortar de una forma muy localizada y por encima de los 30.000 °C llevando el gas utilizado hasta el cuarto estado de la materia, el plasma, estado en el que los electrones se disocian del átomo y el gas se ioniza (se vuelve conductor).</p> <p data-bbox="508 1780 1274 1917">En pocas palabras el corte por plasma se basa en la acción térmica y mecánica de un chorro de gas calentado por un arco eléctrico de corriente continua establecido entre un electrodo ubicado en la antorcha y la pieza a mecanizar. El chorro de plasma lanzado contra</p>

Tecnología	Descripción general
	<p>la pieza penetra la totalidad del espesor a cortar fundiendo y expulsando el material.</p> <p>La ventaja principal de este sistema radica en su reducido riesgo de deformaciones debido a la compactación calorífica de la zona de corte. También es valorable la economía de los gases aplicables ya que a priori es viable cualquiera si bien es cierto que no debe de atacar al electrodo ni a la pieza.</p>
<p>Corte por laser</p> 	<p>Es una técnica empleada para cortar piezas de chapa caracterizada en que su fuente de energía es un láser que concentra luz en la superficie de trabajo. Para poder evacuar el material cortado es necesario el aporte de un gas a presión como por ejemplo oxígeno, nitrógeno o argón.</p> <p>Es especialmente adecuado para el corte previo y para el recorte de material sobrante pudiendo desarrollar contornos complicados en las piezas.</p> <p>Entre las principales ventajas de este tipo de fabricación de piezas se puede mencionar que no es necesario disponer de matrices de corte y el accionamiento es robotizado.</p> <p>Para destacar como puntos desfavorables se puede mencionar que este procedimiento requiere una alta inversión en maquinaria y cuanto más conductor del calor sea el material mayor dificultad habrá para cortar.</p>
 <p>MTM</p>	<p>Las últimas máquinas herramientas de múltiples funciones son capaces de realizar torneados y fresados logrando reducir al mínimo el número de configuraciones requeridas para mecanizar una pieza. Con el apoyo de operaciones simultáneas en varios ejes ayudan a mejorar la productividad de taller.</p>

3.2.3 Técnicas de programación CN

La programación de los controles numéricos ha sufrido una gran evolución en los últimos años. Ésta consiste en elaborar y codificar la información necesaria para mecanizar una pieza en un lenguaje que la máquina sepa interpretar. Las dos modalidades de programación son la manual y la automática.

Para el caso del **CAM manual** el programa pieza se escribe únicamente por medio de razonamientos y cálculos que realiza un operario.

Grupo Diseño, Gestión y Desarrollo de Nuevos Productos

Al conjunto de informaciones que corresponde a una misma fase del mecanizado se le denomina bloque o secuencia que se numeran para facilitar su búsqueda. Este conjunto de informaciones es interpretado por el intérprete de órdenes. Una secuencia o bloque de programa debe contener todas las funciones geométricas, funciones máquina y funciones tecnológicas del mecanizado. De tal modo un bloque de programa consta de varias instrucciones.

El comienzo del control numérico ha estado caracterizado por un desarrollo anárquico de los códigos de programación. Cada constructor utilizaba el suyo particular. Posteriormente se vio la necesidad de normalizar los códigos de programación como condición indispensable para que un mismo programa pudiera servir para diversas máquinas con tal que fuesen del mismo tipo.

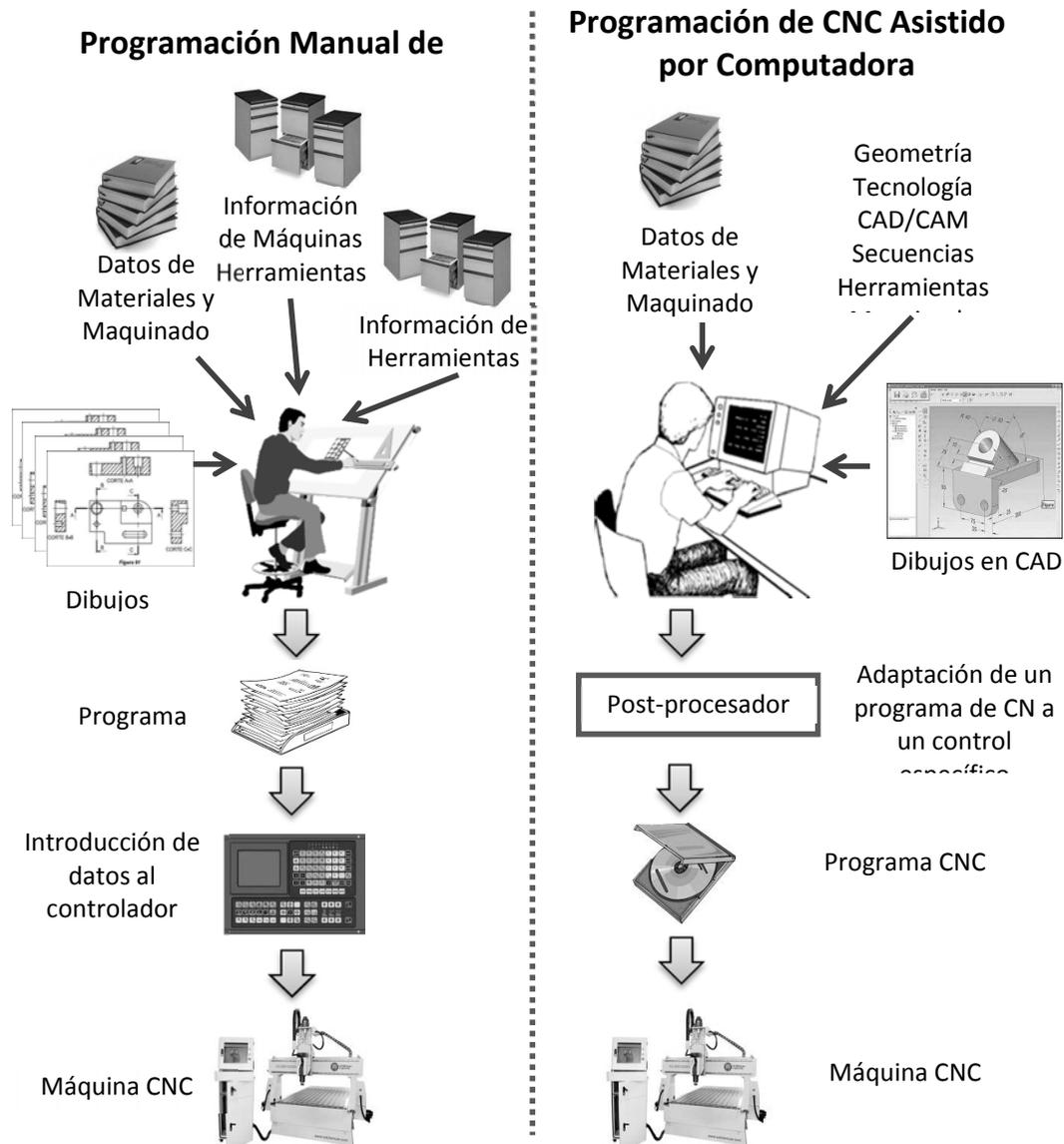


Fig. 3.2. Métodos de programación de sistemas CNC.

Para el caso del **CAM automático** los cálculos son realizados por un computador a partir de datos suministrados por el programador dando como resultado el programa de la pieza en un lenguaje de

intercambio llamado APT que posteriormente será traducido mediante un post-procesador al lenguaje máquina adecuado para cada control. Esta es la esencia del sistema CAM.

Cuando el perfil es complejo y la precisión requerida elevada el gran número de cálculos de puntos intermedios es inabordable por métodos manuales. La programación manual de 3 y más ejes, a poco compleja que sea la pieza, no es aconsejable sin apoyo del ordenador.

3.2.4 Ventajas y desventajas del CN y CNC

Las principales ventajas de esta forma de trabajo son:

- Reducción de los tiempos de ciclos operacionales.
- Mayor precisión e intercambiabilidad de las piezas.
- Reducción del porcentaje de piezas defectuosas.
- Reducción del tiempo del cambio de piezas.
- Reducción del tamaño del lote.
- Reducción del tiempo de inspección.

Entre las desventajas podemos nombrar:

- Alto costo de la maquinaria.
- Costos de mantenimiento y capacitación.
- Es necesario mantener un volumen de producción más o menos constante para lograr una mayor eficiencia de la capacidad instalada.

3.2.5 Metodología de trabajo en función de la cantidad de piezas producidas

Según la cantidad de piezas a realizar podemos hablar de tres sistemas de trabajo:

- 1) **Prototipo.** Las técnicas de prototipado (que desarrollaremos más adelante) se llevan a cabo cuando se requieren una o muy pocas unidades ya sea porque son únicas, especiales, de prueba o para estudiar alguna de sus características.
- 2) **Mecanizado por CNC.** Su principal aplicación se centra en volúmenes de producción medios de piezas sencillas y en volúmenes de producción medios-bajos de piezas complejas permitiendo realizar mecanizados de precisión con la facilidad que representa cambiar de un modelo de pieza a otra mediante la inserción del programa correspondiente. Como límite práctico se toma un máximo de piezas que rondan las 1000 unidades.
- 3) **Líneas de transferencia de flujo "Transfer".** Se suelen utilizar para producción de altos volúmenes (>1000 unidades) y son muy cotizadas. Una línea de flujo automatizada está compuesta de varias máquinas o estaciones de trabajo las cuales están conectadas por dispositivos que transfieren los componentes entre las estaciones. La transferencia de componentes se da automáticamente y las estaciones de trabajo llevan a cabo automáticamente sus funciones específicas.

3.3 Clasificación de los sistemas CAM

Como mencionamos en el apartado anterior, en general, la información geométrica de la pieza para un sistema CAM proviene de un programa CAD que puede estar o no integrado con el sistema CAM. Si no está integrado dicha información geométrica se pasa a través de un formato común de intercambio gráfico.

Grupo Diseño, Gestión y Desarrollo de Nuevos Productos

Como alternativa algunos sistemas CAM disponen de herramientas CAD que permiten al usuario introducir directamente la geometría de la pieza, si bien en general no son tan ágiles como las herramientas de un sistema propiamente de CAD.

Entonces, a partir de lo mencionado, podemos hacer una primera clasificación:

- **CAM integrado** con sistemas CAD.
- **CAM NO integrados** con programas CAD.

Una segunda clasificación puede estar relacionada con el tipo de interfaz existente entre el sistema CAM y el sistema informático. Es así que podemos hacer la siguiente distinción:

- **Interfaz directa:** Son aplicaciones en las que el ordenador se conecta directamente con el proceso de producción para monitorizar su actividad y realizar tareas de supervisión y control. Así pues, estas aplicaciones se dividen en dos subgrupos:
 - **Supervisión:** implica un flujo de datos del proceso de producción al computador con el propósito de observar el proceso y los recursos asociados y recoger datos.
 - **Control:** supone un paso más allá que la supervisión ya que no sólo se observa el proceso sino que se ejerce un control basándose en dichas observaciones.
- **Interfaz indirecta:** Se trata de aplicaciones en las que el ordenador se utiliza como herramienta de ayuda para la fabricación pero en las que no existe una conexión directa con el proceso de producción.

Una tercera clasificación podría estar fundamentada en la metodología utilizada para generar el programa CAM para la pieza u objeto en cuestión. De este modo tenemos sistemas de programación manual y automática, por ende hablamos de CAM manuales o automáticas.

Por último, los sistemas CAM se pueden clasificar según los grados de libertad del sistema:

- **2D:** la herramienta de trabajo tiene dos grados de libertad. Una alternativa en algunas máquinas es el sistema $2\frac{1}{2}$ D.
- **3D:** la herramienta tiene capacidad de movimiento en los tres ejes coordenados.
- **4D:** la herramienta tiene tres grados de libertad y la pieza tiene uno.

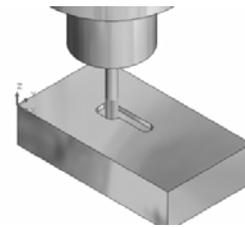


Fig. 3.3. Sistema CAM 3D.

- **5D:** La herramienta de trabajo tiene 3 grados de autonomía y la pieza a trabajar 2.

3.4 Secuencias del proceso CAM (2D)²

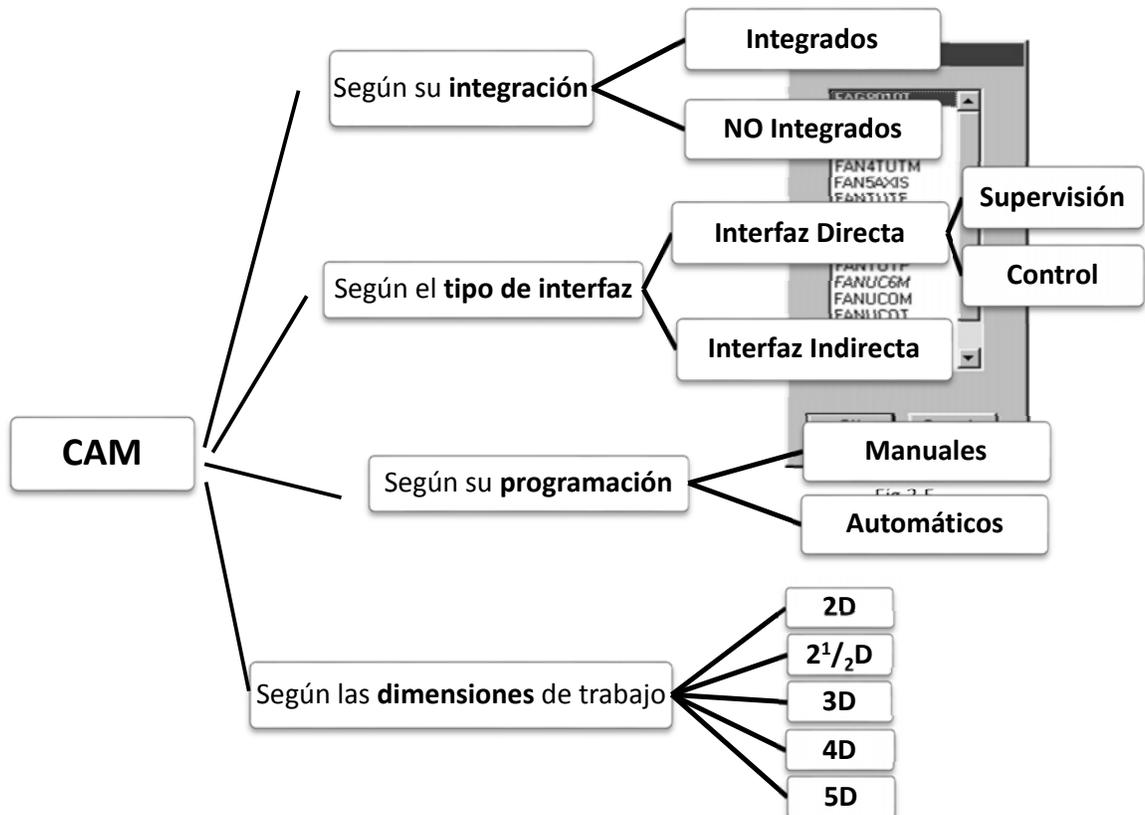


Fig.3.4. Clasificación de sistemas CAM.

La mayor ventaja de la programación CAM integrada con CAD es que en cualquier momento se puede modificar cualquier paso de forma realmente fácil. La configuración de las operaciones es independiente del control específico con el que posteriormente se mecanizará la pieza. Asimismo se puede optimizar el proceso de mecanizado planteando diferentes alternativas (herramientas, velocidades, avances, etc.) y seleccionando al final aquellas que mayor rendimiento aporten.

Estos pasos se aplican a todos los tipos de procesos donde se utiliza ventajosamente la programación CAD/CAM 2D tales como fresado, torneado, punzonado...

- 1. Dibujar en el sistema CAD la geometría** necesaria para la configuración de las operaciones de mecanizado.
- 2. Seleccionar el CNC** de nuestra máquina-herramienta y especificar la información de configuración. Al pasar por primera vez del sistema CAD al CAM el sistema solicita la selección del control que se usará. Posteriormente permite cambiarlo aunque sólo entre aquellos controles del mismo tipo de mecanizado. Esto es, si se elige un post procesador de torneado no podremos cambiarlo por uno de fresado. Por este motivo este paso es el más importante.

² Ver ANEXO C: "Ejemplos de CAM"

3. Definir las herramientas. Cada operación de mecanizado precisa de la herramienta oportuna. Antes de generar el camino de la herramienta el usuario debe definir sus parámetros. Al final del programa de una pieza se obtiene una tabla de herramientas. Si se suelen utilizar siempre las mismas, se puede establecer el listado habitual como el de defecto cuando se inicia el sistema CAD/CAM.

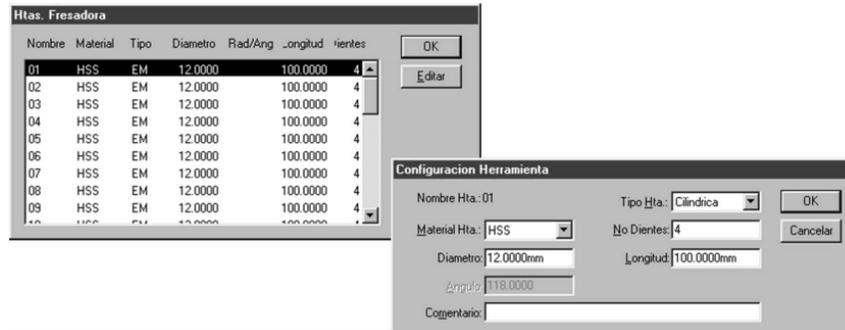


Fig.3.6. Selección de Herramientas.

4. Generar los caminos de herramienta. Al pasar al sistema CAM se permuta la barra de CAD por la de operaciones CAM que corresponde al tipo de mecanizado del control CNC seleccionado. La configuración de las operaciones de mecanizado se realiza a través de la ventana de configuración de operación, la barra de variables y el cuadro de parámetros de postprocesado. Tras configurar todos estos parámetros se deben aplicar sobre la geometría CAD. En el caso del taladrado se pueden señalar directamente las posiciones de taladrado. En el caso de operaciones de vaciado y contorneado se precisa un paso intermedio que es la construcción de contornos.

5. Postprocesar el fichero CAM para obtener el código CN. El comando *Postprocesado*, en la barra de herramientas, traslada la trayectoria de herramienta y la información de operación a código CN que puede ser interpretado por un control. El sistema crea código CN para cada camino de herramienta en la pieza siguiendo el orden en que las operaciones aparecen en el listado de operaciones. Al postprocesar, mientras se genera el código CN, podemos visualizarlo y resaltar el corte en pantalla, todo ello de forma continua paso a paso.

El fichero de programa CN contiene los comandos CNC para la unidad de control de la máquina para activar las funciones de herramienta y los movimientos de esta. Este fichero es un fichero de texto ASCII que tiene una extensión **.txt**. Este programa contiene los comandos para hacer que la máquina realice las operaciones requeridas.

3.5 Ventajas del CAM

Las ventajas que presenta el sistema CAM son prácticamente las vistas para los sistemas CNC. En forma general son:

- Se pueden acortar notablemente los tiempos de desarrollo, planificación y fabricación de los productos.
- Mejora la calidad de los distintos componentes y del producto terminado.
- Reducción de los tiempos muertos.
- Se facilita la valoración de soluciones alternativas para la reducción de precios o la mejora de funciones.

- Se facilitan los cálculos previos y posteriores de los precios así como su control constante y configuración.
- Se hace posible la optimización de la distribución del grado de utilización de las máquinas.
- Se consigue mayor flexibilidad.
- Se utiliza un interfaz fácil de manejar.
- El usuario indica gráficamente las trayectorias que desea sobre un modelo CAD.
- El código es generado automáticamente.

3.6 Datos interesantes

Tabla 3.2. Software comerciales de mayor difusión en el mercado actual.

SOFTWARE COMERCIALES		
Software	Descripción	Prestaciones
MASTECAM	Sistema CAM con base en tecnologías CAD	Software que permite obtener las trayectorias de las herramientas necesarias para el mecanizado incluyendo taladrados, cara, piel de molino, grabado, etc.
CAMWORKS		
NX UNIGRAPHICS	Programa CAD con utilidades CAM	Es capaz de generar trayectorias completas
CATIA		
PRO-ENGINEER		Capaz de generar trayectorias completas y detectar interferencias (colisiones).

En la mayoría del software comercial podemos encontrar un sistema de simulación de mecanizado que permite representar las trayectorias de las herramientas y simular el arranque del material sin que se produzcan condiciones de corte.

El modelo digital que se obtiene del diseño debe estar en formato **.stt** para cargarlo en el sistema CAM.

3.7 Nesting

3.7.1 Descripción general

El Nesting es un sistema CAD/CAM concebido para la generación de trayectorias de corte a partir de distribuciones de piezas en chapas con anidamiento bidimensional.

Su propósito es automatizar la programación de máquinas de corte de chapa conjugando perfectamente la tecnología de la máquina con las necesidades de programación y gestión del cliente siguiendo el objetivo de aprovechar al máximo el material, optimizar su utilización, maximizar la producción de la empresa y reducir el gasto de tiempo y placas.

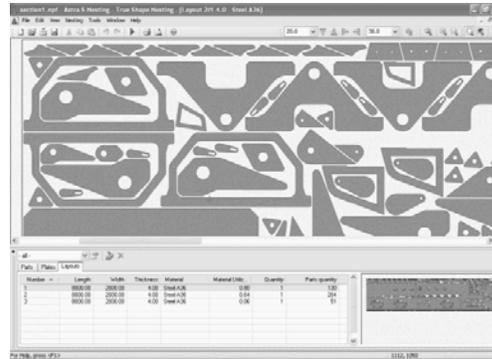


Fig.3.7. Ejemplo de anidado o nesting.

Generalmente los software de Nesting integran en un solo programa herramientas que permiten:

- Diseñar, importar y exportar geometrías.
- Hacer el Nesting o anidado y generar la secuencia de corte.
- Generar el programa CNC.
- Ver y gestionar el almacén de chapas.
- Calcular tiempos y costos de operación.

Funciones características: optimización de piezas pequeñas dentro de piezas más grandes, radios automáticos para trazos de herramientas de entrada y salida, entre otros.

3.7.2 Características y limitaciones

Algunos sistemas de Nesting permiten sólo la anidación de formas rectangulares mientras que otros ofrecen un perfil de anidación donde las partes requeridas pueden ser de cualquier forma. Estas piezas irregulares pueden ser creadas usando conocidas herramientas CAD. La mayor parte del software de anidamiento puede leer archivos IGES o DXF automáticamente y algunos de ellos trabajan con una función de convertidores.

El software de anidamiento debe tener en cuenta las limitaciones y características de la tecnología de mecanizado en uso tales como:

- El mecanizado no puede realizarse en las zonas donde se sujeta la materia prima.
- Algunas máquinas pueden acceder sólo a la mitad del material en un momento determinado, luego la máquina gira automáticamente la hoja de material para procesar la mitad restante.
- Cuando se utiliza punzonado se debe considerar el espesor de la herramienta empleada.
- El cizallamiento se permitirá sólo en ciertas áreas de la hoja debido a las limitaciones de las máquinas.
- Un láser puede cortar piezas en cualquier dirección, una perforadora sólo puede hacerlo en ángulo recto.

El software de anidamiento también debe tener en cuenta las características de los materiales tales como:

- Los defectos en el material deben ser desechados.
- Diferentes áreas de calidad deben coincidir con los correspondientes niveles de calidad exigidos para las diferentes piezas.
- Restricciones de dirección que pueden provenir de un patrón impreso o de la dirección de la fibra.

Muchos fabricantes de máquinas ofrecen su propio software personalizado anidación diseñado para ofrecer facilidad de uso y aprovechar al máximo las características de sus máquinas específicas. Algunos de los desarrolladores de sistemas de Nesting más conocidos en el mercado son: Alma, SigmaNest, Lantek y Metalix los cuales cuentan con filiales en diversos países del mundo.

3.7.3 Clasificación

Una clasificación posible de este tipo de programa se puede basar en el modo en que se disponen las geometrías en la chapa para realizar el anidamiento; a partir de esto podemos hablar de:

- **Nesting Manual:** que permite ubicar, rotar, mover, adosar, copiar, etc. piezas de manera manual en la chapa para definir las trayectorias de corte. El programa calcula los tiempos y costos.
- **Nesting Automático:** el software determina por sí mismo la disposición de las distintas piezas a cortar aprovechando espacios y material y luego calcula el tiempo y costo de operación.
- **Nesting Mixto:** en este tipo de sistemas se pueden ordenar piezas de manera manual y luego anexar otras de forma automática respetando la disposición de las primeras.

3.7.4 Técnicas de Nesting

Existen dos estrategias de anidación de uso frecuente en 2D: el **Nesting Estático** y el **Nesting Dinámico**. Ambas estrategias indican los medios y el método por el cual las partes están ordenadas, dispuestas o diseñadas y producidas en el láser, punzón, plasma, router u otros equipos de fabricación.

Aunque sirven a la misma necesidad de anidación las diferencias entre los dos enfoques son sorprendentes.



Fig.3.8. Nesting 2D – Router.

Tabla 3.3. Diferencias entre Nesting estático y dinámico.

CARACTERÍSTICA	ESTÁTICO	DINÁMICO
SELECCIÓN DE PIEZAS	El usuario selecciona una parte o unas pocas partes y crea un nido o diseño de parte única. Entonces usa ese modelo "estático" o inmutable de las partes en varias ocasiones en el corte de una o, a menudo, muchas hojas de material. El	El usuario trabaja con una gran variedad de piezas sobre un número ilimitado de nido o sábanas. Cada hoja puede tener una combinación única de las partes reflejadas tanto en su cantidad como su orientación.

CARACTERÍSTICA	ESTÁTICO	DINÁMICO
	resultado neto es una gran cantidad de la misma parte.	
PRIORIDAD DE PIEZAS	El orden de prioridad es una preocupación secundaria o menor. Las partes individuales son producidas en masa como una función de la eficiencia de los materiales. Por ejemplo, si es necesaria una cantidad de una de una parte en particular, se procesa una hoja entera o muchas hojas de la parte. Si se producen más partes que las necesarias las restantes se desechan o son inventariadas.	Se evalúa automáticamente la prioridad junto con la necesidad de la eficiencia de los materiales. Los pedidos de piezas son gestionados para asegurar que la prioridad más alta se produzca primero y las partes sean seleccionadas para conseguir la eficiencia del material óptima.
RESPUESTA AL CAMBIO	La respuesta al cambio puede ser muy difícil. Si una pieza con una nueva revisión es necesaria, el nido entero necesita ser vuelto a montar y programar de nuevo. Si se necesita un cambio urgente o bien se ejecuta como una sola pieza en una hoja individual o el nido estático se modifica para que se incorpore.	Se construye sobre la naturaleza absorbente de flujo de producción. Si hay una nueva revisión el problema se aborda en el nido ya que la anidación es Just-in-Time. No hay un "nido existente" para modificar o reconstruir. Cada nido se crea sobre la base de las circunstancias actuales. Si existe una cola de nidos por procesar el operador puede eliminar los nidos aún no producidos, los cambios integrados y los nidos reensamblados en minutos.
VELOCIDAD DE ANIDACIÓN	El gasto significativo de tiempo está en el la primera creación del nido y cualquier modificación hecha a partir de entonces. Los nidos estáticos pueden ser reutilizados una y otra vez insumiendo poco o ningún gasto de tiempo.	Los nidos dinámicos se pueden crear en segundos o minutos. El usuario no está ligado a la creación de cada nido por separado. Se puede crear una serie de nidos para un ciclo de producción, un cambio, etc. o el operador de la máquina puede llamar un nido aleatorio en el tiempo (JIT) que refleja la demanda actual.

CARACTERÍSTICA	ESTÁTICO	DINÁMICO
CANTIDAD Y ORIENTACIÓN DE PARTES	Son rígidos en establecer su diseño. Por cada nido se establece la cantidad, la variedad y la orientación de piezas. Estos parámetros no van a variar en toda la ejecución de ese nido en particular.	Las configuraciones se crean de forma exclusiva. A menos que el volumen de las partes de varias hojas se haya hecho con el mismo nido el patrón no se repite. Esto abre la posibilidad de cambiar la cantidad y la orientación de cada parte en cada nido para optimizar la eficiencia de los materiales, para mantener el orden o la cohesión o para satisfacer otras demandas.
AUTOMATIZACIÓN	Es muy adecuado para un proceso de creación humana o manual. Si el nido es considerado como un rompecabezas es bastante sencillo diseñar cinco o cincuenta piezas iguales en una hoja. Incluso si algunas partes se introducen en la mezcla todavía puede ser manejable. Se necesita tiempo, pero es factible.	Puede tener en cuenta una cantidad mucho más grande de piezas, gestionar las prioridades, evaluar las necesidades de eficiencia de materiales, considerar un total de 360° de rotación para cada parte y gestionar herramientas y/o tabulación. Va mucho más allá de las capacidades de interacción humana o manual.

En conclusión podemos decir que a menudo descubrimos que el **Nesting Estático** es un método que nace de la necesidad de reducir el tiempo de programación y todavía tiene un rendimiento respetable. Sólo cuando se complica el control de inventario, el desecho es demasiado alto o los cambios ocurren demasiado rápido, esta solución se convierte en inviable y es necesario introducir la automatización con software de **Nesting Dinámico**.

3.7.4 Tecnologías de aplicación (ver punto 2.2.2 Maquinaria)

Las tecnologías en las que se aplican los sistemas de Nesting son aquellas abocadas al corte de chapas. Estas son:

- Oxicorte y corte por plasma.
- Corte por láser.
- Corte por chorro de agua.

3.7.5 Ventajas

Algunas de las ventajas más relevantes que este sistema presenta son:

- Aprovechamiento de chapa que permite ahorrar tiempo y dinero.
- Soluciones simples.
- Administración de desechos y restos con la posibilidad, en algunos casos, de reutilizar partes sobrantes.
- Compilación inteligente de piezas y reducción de errores.
- Cálculos de costos y tiempos de fabricación.
- Fácil utilización, generalmente presentan interfaces muy sencillas y gráficas.

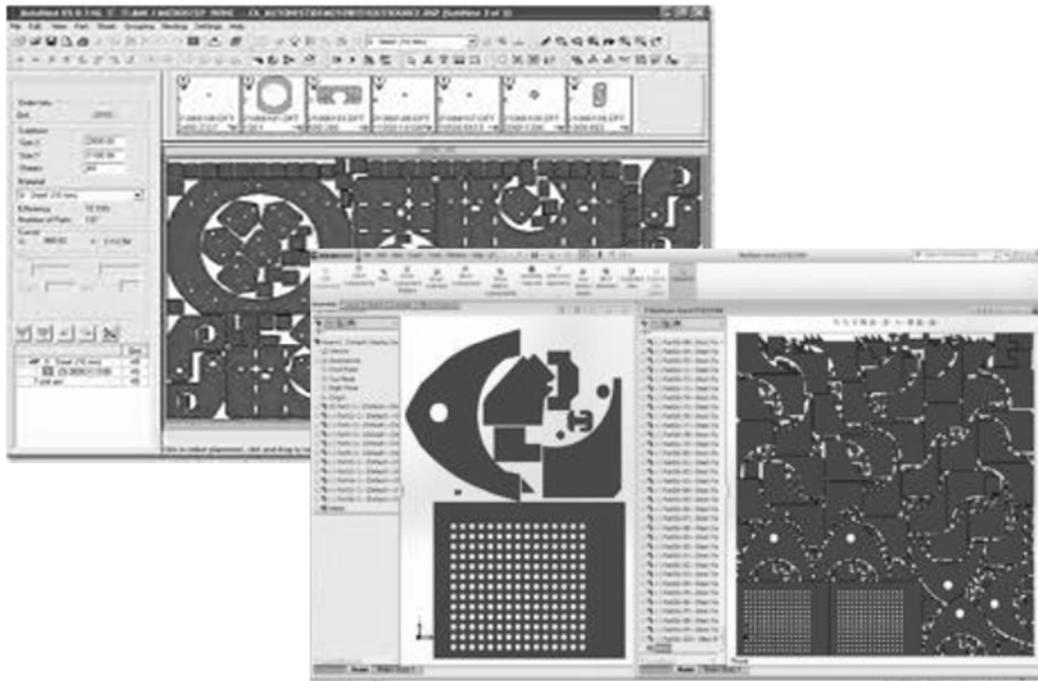


Fig.3.9. Ejemplos de Nesting.

3.8 Programación de control numérico ISO estándar (código G)

3.8.1 Estructura de un programa CNC

Todos los programas deben tener un nombre o un número identificador. Algunos controles numéricos sólo aceptan números.

Los programas CNC están compuestos por bloques sucesivos. Cada uno de éstos es una instrucción para el control. Pueden estar numerados o no. De no estarlos el control los ejecutará en el orden en que los vaya encontrando.

La numeración de los bloques puede no ser de uno en uno, de cinco en cinco, de diez en diez, etc. Esto es conveniente para introducir luego bloques intermedios sin alterar toda la numeración, que debe ser siempre creciente porque si existiera un bloque cuyo número sea menor al anterior el control detiene la ejecución del programa.

Los bloques de programación de CNC son:



Dentro de cada bloque debe mantenerse este orden. Sin embargo no es necesario que estén presentes todos los ítems. Se puede programar en sistema métrico (mm) o en pulgadas.

N4 G71 G2 X, Y, Z +/- 4.3 F5.5 S4 T2.2 M2 (métrica)

N4 G70 G2 X, Y, Z +/- 4.3 F5.5 S4 T2.2 M2 (en pulgadas)

El número que acompaña cada ítem significa el número de dígitos admisible. Así por ejemplo:

- **N4** significa que el número de bloques no deberá ser mayor que 9999. Esto varía según la marca de control numérico.
- **Z +/- 4.3** significa que las cotas pueden tener valores positivos o negativos de no más de 4 dígitos enteros y 3 decimales.

Los bloques condicionales son ejecutados o no en función de la presencia de una señal externa al programa. Sirven por ejemplo para programar paradas para inspecciones del trabajo, cambios de herramienta, etc. Se determina la condicionalidad de un bloque agregando un punto luego del número del bloque. La señal externa normalmente es un switch en el control. Si este switch está activado la ejecución del programa se detendrá al encontrar un bloque condicional. Si no lo está el programa seguirá ejecutándose normalmente.

3.8.2 Instrucciones de movimiento o preparatorias (Funciones G)

En un mismo bloque se pueden programar todas las funciones G que se quiera y en cualquier orden salvo G20, G21, G22, G23, G24, G25, G26, G27, G28, G29, G30, G31, G32, G50, G52, G53/59, G72, G73, G74, G92 que deben ser programadas en bloques por separado. Si en un mismo bloque se programan funciones incompatibles se detiene la ejecución del programa.

Tabla 3.4. Instrucciones de movimiento

G00	*	**	Posicionamiento rápido
G01		**	Interpolación lineal
G02		**	Interpolación circular en sentido horario

Grupo Diseño, Gestión y Desarrollo de Nuevos Productos

G03		**	Interpolación circular en sentido antihorario
G04			Temporización
G05	*	**	Arista matada
G06			Interpolación circular con centros en absolutas
G07	*	**	Arista viva
G08			Arco tangente a la trayectoria anterior
G19			Interpolación circular por tres puntos
G10	*	**	Anulación imagen espejo
G11		**	Imagen espejo en eje X
G12		**	Imagen espejo en eje Y
G13		**	Imagen espejo en eje Z
G17	*	**	Plano XY
G18		**	Plano XZ
G19		**	Plano YZ
G20			Llamada a subrutina estándar
G21			Llamada a subrutina paramétrica
G22			Definición de subrutina estándar
G23			Definición de subrutina paramétrica
G24			Final de definición de subrutina
G25			Llamada incondicional
G26			Llamada condicional si igual a 0
G27			Llamada condicional si distinto de 0
G28			Llamada condicional si menor
G29			Llamada condicional si mayor o igual

G30			Visualizar error definido por K
G31			Guardar origen de coordenadas
G32			Recuperar origen de coordenadas
G33		**	Roscado electrónico
G36			Redondeo controlado de aristas
G37			Entrada tangencial
G38			Salida tangencial
G39			Achaflanado
G40	*	**	Anulación de compensación de radio
G41		**	Compensación de radio a la izquierda
G42		**	Compensación de radio hacia la derecha
G43		**	Compensación de longitud
G44		**	Anulación de compensación de longitud
G47		**	Bloque único
G48	*	**	Anulación de bloque único
G49		**	Feed programable
G50		**	Carga de longitudes de herramienta
G53		**	Traslado de origen
G54		**	Traslado de origen
G55		**	Traslado de origen
G56		**	Traslado de origen
G57		**	Traslado de origen
G58		**	Traslado de origen
G59		**	Traslado de origen
G70		**	Programación en pulgadas

Grupo Diseño, Gestión y Desarrollo de Nuevos Productos

G71		**	Programación en mm
G72		**	Escalado definido por K
G73		**	Giro de sistema de coordenadas
G74			Búsqueda de cero máquina
G75			Trabajo con palpador
G75 N2			Ciclos fijos de palpador
G76			Creación de boques
G79		**	Ciclo fijo definido por el usuario
G80	*	**	Anulación de ciclos fijos
G81		**	Ciclo fijo de taladrado
G82		**	Ciclo fijo de taladrado con temporización
G83		**	Ciclo fijo de taladrado profundo
G84		**	Ciclo fijo de roscado con macho
G85		**	Ciclo fijo de escariado
G86		**	Ciclo fijo de alesado con retroceso en G
G87		**	Ciclo fijo de cajera rectangular
G88		**	Ciclo fijo de cajera circular
G89		**	Ciclo fijo de alesado con retroceso en G
G90	*	**	Programación en absolutas
G91		**	Programación en incrementales
G92			Preselección de cotas
G93			Coordenadas polares
G94	*	**	F en mm/min
G95		**	F en mm/Rev.
G96		**	F constante

G97	*	**	F del tip constante
G98	*	**	Vuelta al plano de seguridad
G99	*	**	Vuelta al plano de referencia

(*) Son las instrucciones que, por defecto, asume el control numérico cuando se lo inicia o después de M02, M30, RESET o EMERGENCIA.

(**) MODAL, significa que una vez que aparece la instrucción permanece activa hasta que sea reemplazada por otra instrucción o por M02, M30, RESET o EMERGENCIA.

Ejemplo:

N50 G01 X20 Y10 Z30 F200 S1000

N60 X100

N70 G00 Z50

Bloque **N50** ordena a la herramienta que vaya desde las coordenadas en que se encuentre (en las que quedó luego de la ejecución del bloque anterior), en **G01** (trayectoria recta) a las coordenadas **N20 Y10 Z30**, a una velocidad de avance (**F**) de 200 mm/min, con el husillo girando (**S**) 1000 RPM.

Bloque **N60**; el movimiento es en **G01**, no especificado en el bloque por ser modal. Ordena ir al **X100**; esto significa que el movimiento no tendrá nuevas cotas en **Y** o **Z** o sea que el nuevo destino es **X100 Y10 Z30**. Al no haber nuevas cotas no es necesario incluirlas en el bloque; también son modales. Al no haber especificaciones de **F** ni de **S** el movimiento se hará con los mismos valores del bloque anterior. **F** y **S** también son modales.

Bloque **N70**, movimiento **G00** desde la cota anterior a **Z50**, asume **F** a la velocidad máxima de la máquina. **S** según último bloque.

Puede programarse en forma absoluta (todos los valores están dados respecto del 0,0,0) o incremental (los valores son relativos a la cota previa). Por defecto los CNC asumen programación en absolutas (**G90**). En caso de querer trabajar con incrementales deberá programarse un **G91** en la línea inicial.

3.8.3 Funciones M (Auxiliares)

Las funciones auxiliares **M** producen distintas acciones en la máquina. Ejemplo: arrancar o detener el husillo, arrancar o detener el suministro de líquido refrigerante. Hay otras que están relacionadas con la ejecución del programa CNC: finalizarlo, resetear valores, etc.; no pueden ser programadas junto con otras funciones sino que deben ir en bloques exclusivos y pueden incluirse hasta siete en un mismo bloque.

Estas son las funciones auxiliares **M** más utilizadas:

Tabla 3.5. Funciones auxiliares

M00	Parada de programa
M01	Parada condicional del programa
M02	Final del programa

M03	Arranque de husillo en sentido horario
M04	Arranque de husillo en sentido anti horario
M05	Parada de husillo
M06	Cambio de herramienta
M30	Final del programa con reseteo de variables

3.8.4 Análisis de algunas de las funciones G

G00 – Posicionamiento Rápido. Son los desplazamientos según el plano de seguridad (Clearance Height) a la máxima velocidad de la máquina. Está definido por una cota en **Z** que asegura que la herramienta podrá desplazarse sin chocar con algún obstáculo. No se pueden programar movimientos **G00** interpolados en 2 o más planos. Normalmente se programa primero la salida en **Z** (por ej. al plano de seguridad) y luego, en otro bloque, el reposicionamiento en **XY**. Para este bloque la máquina buscará primero la cota **X** y luego a **Y**. Es decir, no interpolara. Si bien esta modalidad es la más común puede variar según las diferentes marcas de control numérico.

La función **G00** es modal e incompatible con **G01, G02, G03 y G33**. En algunos controles **G00** no anula la última **F** programada y en otros sí, por lo que hay que volver a programarla luego de la ejecución de un **G00**.

G01 – Interpolación Lineal. Pueden ser movimientos con variación simultánea en los 3 ejes. Esto significa que pueden ser trayectorias espaciales no paralelas a ninguno de ellos. El CNC calculará las velocidades relativas según cada uno de los ejes de manera que el resultado de la combinación sea una trayectoria rectilínea. El **G01** se ejecuta a la **F** programada aunque ésta puede ser luego variada durante la ejecución del programa. Normalmente **F** es modal. **G01** no puede ser incluida en un mismo bloque con **G00, G02, G03 y G33**.

G02 y G03 – Interpolaciones Circulares. Son trayectorias según arcos de circunferencia. Sólo pueden ejecutarse en un plano determinado: **XY, XZ o YZ**. En este caso el CNC deberá no sólo calcular las velocidades relativas de cada eje sino también la aceleración y desaceleración de los movimientos para obtener una trayectoria circular. La manera de programarla es la siguiente (para plano **XY**):

N G02(G03) X+/-4.3 Y+/-4.3 I+/-4.3 J+/-4.3 F

I y **J** definen el centro del arco según los ejes **X** e **Y** respectivamente. Normalmente son incrementales respecto del punto de inicio de la trayectoria circular (o sea el par de cotas **X** o **Y** del bloque anterior) aunque esto puede variar según la marca del CNC. En algunos de ellos los valores de **I** y **J** deben ser programados en absolutas. En los que definen centro en incrementales puede programarse un **G02/G03** incluyendo un **G06** en el bloque. Los valores **I** y **J** deben incluirse siempre aunque sean iguales a 0. Normalmente el **F** es un modal para estas funciones. También puede programarse un **G02/G03** de la siguiente forma:

N G02(G03) X+/-4.3 Y+/-4.3 R+/-4.3 F

En este caso no hay definición de I y J sino de R, el radio del arco de circunferencia. Este modo tiene las siguientes limitaciones: no se pueden programar circunferencias completas; si el arco es menor de 180° llevará signo (+) y si es mayor llevará signo (-).

G05 – Arista matada. Cuando se incluye un G05 en un bloque el CNC comienza la ejecución del siguiente durante el período de desaceleración del anterior. El resultado es un empalme de trayectorias que producen un redondeo de las inflexiones del recorrido. El radio de estos redondeos es proporcional al F. Esta función es modal.

G07 – Arista viva. Esta función determina que un bloque no sea iniciado hasta que las cotas del anterior no hayan sido alcanzadas. En este caso se producen inflexiones vivas. Esta función es modal.

G08 – Trayectoria circular tangente a la anterior. Permite programar un arco tangente a una trayectoria anterior sin aplicar G02/G03. No es modal. No permite círculos completos.

```
N10 G01 X30 Y20
N20 G08 X50 Y40
N30 G08 X60 Y50
N40 G01 X90
```

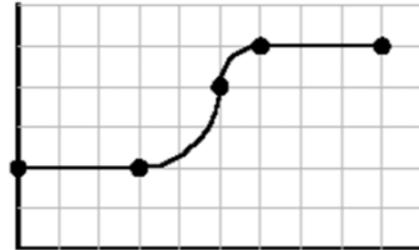


Fig.3.10. Trayectoria circular tg a la anterior.

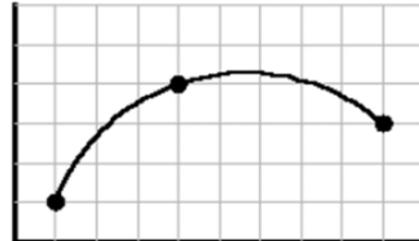


Fig.3.11. Trayectoria circular definida por 3 puntos.

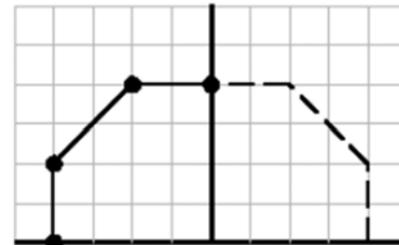


Fig.3.12. Imágenes en espejo.

G09 – Trayectoria circular efinida por 3 puntos.

Permite programar un arco definiendo el punto final y un punto intermedio. El inicial es el definido por el loque anterior. No es modal. No permite círculos completos. **10 G01 X10 Y10**

N20 G09 X90 Y30 I40 J40

El punto intermedio se programa usando I y J.

G10, G11, G12 y G13 – Imágenes en espejo.

G10 Anulación de imagen en espejo.

G11 Espejo según eje X.

G12 Espejo según eje Y.

G13 Espejo según eje Z.

Este tipo de funciones son ayudas que simplifican la programación CNC. En este caso permiten obtener simetrías sin tener que programar todos los movimientos.

Las funciones Imagen Espejo deben ser entendidas como la ejecución de un boque anterior con el signo de la cota correspondiente al eje seleccionado, cambiada.

N10 G01 X-40 Y20

N20 X-12 Y40

N30 X0

N40 G11

N50 G25 N10.30

N60 G10

Los primeros tres bloques definen una poligonal. **N40** llama a ejecutar una Imagen Espejo cambiando las coordenadas en X. **N50** indica que se espejarán los bloques desde el **N10** al **N30** inclusive. **G25** es una llamada específica para este tipo de instrucción. En **N60**, **G10** anula la imagen espejo.

G31 y G32 – Guardar y recuperar origen de coordenadas. **G31** permite guardar el origen de coordenadas que se esté utilizando para establecer un nuevo origen con **G53/G59**. En caso de ser necesario volver al origen inicial se programará un **G32**. Esta función recupera los datos guardados con un **G31**.

G36 – Redondeo controlado de aristas. Permite redondear inflexiones de la trayectoria en forma controlada sin necesidad de programar interpolaciones circulares. Debe programarse en el bloque de la trayectoria cuyo final se quiere redondear. El radio del redondeo debe ser positivo.

N10 G36 R20 G01 X80 Y50

N20 Y0 G36 no es modal.

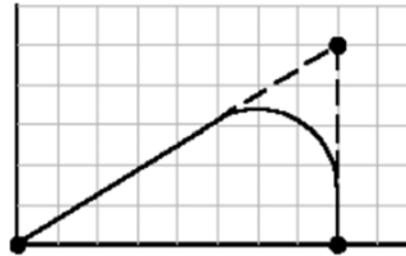


Fig.3.13. Redondeo controlado de aristas.

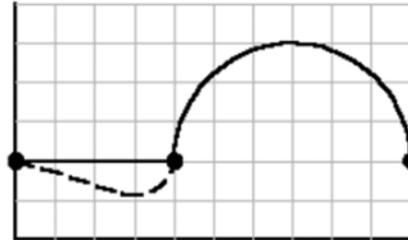


Fig.3.14. Entrada tangencial.

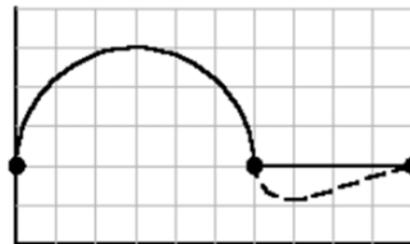


Fig.3.15. Salida tangencial.

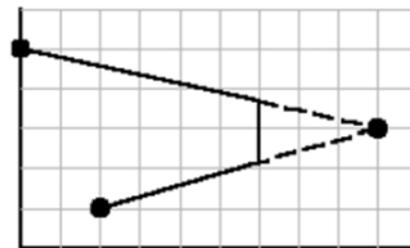


Fig.3.16. Achaflanado.

G37 – Entrada tangencial. Esta función permite empalmar tangencialmente la trayectoria definida en el bloque siguiente. Se utiliza para evitar que la herramienta deje marcas indeseables en la pieza. Es el caso típico del mecanizado de superficies convexas (ej. machos) en los que la herramienta ataca lateralmente al material.

N30 G37 R10 G01 X40 Y20

N20 G02 X100 Y20 I30 J0

La trayectoria resultante es la de la línea punteada. Sólo se puede programar **G37** en un **G01** o en un **G00**. $R=2r$ de la fresa o mayor.

G38 – Salida tangencial. Permite salir tangencialmente de una trayectoria. Se utiliza para evitar que la herramienta deje marcas indeseables en el mecanizado de piezas convexas.

N10 G38 R10 G02 X60 Y20 I30 J0

N20 G01 X100

La trayectoria resultante es la de la línea punteada. **G38** debe programarse en el bloque del que sale.

G39 – Achaflanado. Esta función permite empalmar dos trayectorias rectas mediante una tercera, también recta, sin necesidad de calcular los puntos de intersección.

N10 G39 R30 G01 X90 Y30

N20 X20 Y10

R especifica la distancia entre el comienzo y el final del chaflán y la intersección de las dos trayectorias.

G40, G41 y G42 – Compensación de radios de herramientas. **G40** Anulación de Compensación de Radio de herramientas.

G41 Compensación de Radio a la derecha de la trayectoria.

G42 Compensación de Radio a la izquierda de la trayectoria.

Supongamos que se quiere mecanizar un cubo de 100 mm de lado con una fresa de $\varnothing 20$. Como las trayectorias de CNC están definidas por el "Tip" de la herramienta (su punto central más bajo) habría que recalcular la trayectoria por 10 mm por fuera del cubo. De no hacerlo así y de programar por las líneas que definen el cubo se obtendría una forma de 90 mm de lado. Recalcular las trayectorias para obtener un cubo puede no resultar difícil. Pero hacerlo para una forma compleja puede ser muy complicado.

Aplicando las funciones de Compensación de Radio no es necesario este rectángulo. Para ello la herramienta debe estar especificada en el inicio del programa con formato Txx.pp.

xx es el número de dos dígitos con el que determinada herramienta está archivada (en el momento en el que se configura el CNC puede crearse una tabla de herramientas disponibles).

yy es un valor de corrección del \varnothing nominal de la herramienta. Estas correcciones son normalmente necesarias por cuestiones de desgastes. Estos valores de corrección también están archivados en la memoria permanente del CNC.

Programados un **G41/G42** podrán programarse las trayectorias según las dimensiones finales de la pieza. Deben ser incluidos en el bloque anterior a aquel que se quiera ejecutar con compensación. Estas

Grupo Diseño, Gestión y Desarrollo de Nuevos Productos

funciones son anuladas por un **G40**. Esta anulación debe ser incluida en el bloque que define la última trayectoria compensada. Solo se puede incluir un **G40** en una trayectoria rectilínea.

G53 a G59 – Traslados de origen. En ciertos trabajos de mecanizado puede resultar útil trasladar el origen de coordenadas a otro punto de la pieza, por ejemplo cuando se quiere repetir una forma en otro(s) lugar(es). Normalmente en un único programa se puede introducir hasta 7 cambios de origen. El formato de aplicación es el siguiente:

N10 G53 X... Y... Z... (se crea un Nuevo origen)

N10 G53 (se aplica el Nuevo origen creado en el bloque anterior)

Estas funciones se usan normalmente en combinación con **G31/G32** (ya analizadas).

G72 – Factor de escalado. Esta función permite agrandar o achicar las dimensiones de una pieza sin cambiar el programa. Se pueden aplicar de dos maneras:

N10 G7 K+/-2.4

K es el factor por el que se multiplican todas las cotas.

N10 g72 X+/-2.4 (por ejemplo)

Este modo escalará la pieza según el factor **K** sólo en el eje **X**. De la misma manera pueden escalarse **Y** o **Z**. Normalmente esta función no debe aplicarse en programas que apliquen compensaciones de herramientas.

G73 – Rotación del sistema de coordenadas. Esta función es una ayuda de programación similar a la de espejado. En este caso permite reproducir un mecanizado ya programado rotándolo respecto del origen de coordenadas.

(del bloque anterior) **X-20 Y0**

N10 G03 X-50 I-15 J0

N20 G01 X-20

N30 G73 A-45

N40 G25 N10.20.3



Fig.3.17. Rotación del sistema de coordenadas.

...) porque la programación CNC toma por defecto como positivo el sentido anti horario y como negativo el sentido horario. La función **G25** llama a repetirse a los bloques definidos por **N**, o sea los bloques del 10 al 20. El tercer dígito (3) indica la cantidad de veces que se repetirá la rotación. Nótese que el valor de **A** es incremental.

Ciclos fijos. Los ciclos fijos permiten, en un único bloque, definir una serie de operaciones cíclicas propias de un mecanizado determinado. Los ciclos fijos más comunes son los de taladrado y los de caja.

G81 – Taladrado. Los bloques de ciclo fijo de taladrado tienen la siguiente conformación:

N4 G81 G98/99 X/Y/Z+/-4.3 I+/-4.3 K2.2 N2

- **G81:** Código del ciclo fijo.
- **G98:** Retroceso al plano de referencia (normalmente ubicado cerca de la superficie de la pieza).
- **G99:** Retroceso al plano de seguridad (ya explicado).

- **X/Y/Z:** Si se trabaja en el plano **XY (G17)** **X** e **Y** definen el punto donde se hará la primera perforación. **Z** define al plano de referencia antes mencionado. Si se trabaja en absolutas **Z** define la distancia desde el cero de pieza. Si se trabaja en incrementales **Z** define la distancia desde el plano de seguridad.
- **I:** Define la profundidad de perforación. Si se trabaja en absolutas **I** define la distancia desde cero pieza. Si se trabaja en incrementales **I** define la distancia desde el plano de referencias.
- **K:** Define el tiempo de espera en el fondo de la perforación antes de iniciarse el retroceso. Valores en segundos.
- **N:** Define el número de veces que se repetirá el Ciclo Fijo. Si no se programa **N** el ciclo se ejecuta **N1**. Repeticiones mayores a 1 sólo tienen sentido si se trabaja en incrementales.

G83 – Taladrado profundo. Este tipo de ciclo fijo se aplica cuando, por la profundidad de la perforación, es necesario levantar cíclicamente la broca para que descargue la viruta.

Los bloques de ciclo fijo de taladrado profundo tienen dos conformaciones posibles.

La primera es:

N4 G38 G98/99 X/Y/Z+/-4.3 I+/-4.3 J2 N2

La diferencia con **G81** está en que **I** define cada cota de penetración en incrementales. **J** define la cantidad de penetraciones según el incremento **I**.

La segunda es:

N4 G83 G98/99 X/Y/Z+/-4.3 I+/-4.3 B4.3 C4.3 D4.3 H4.3 J2 K2.2

- **I:** Profundidad del mecanizado. En absolutas respecto del cero de pieza. En incrementales respecto del plano de referencias.
- **B:** Profundización incremental para cada paso (valor positivo).
- **C:** Distancia de la profundización anterior para bajar en G00.
- **D:** Distancia entre plano de referencia y la superficie de la pieza.
- **H:** Distancia de retroceso en G00. Si no figura retrocede hasta PR.
- **J:** Cada cuántas penetraciones hay retroceso hasta PR.
- **K:** Tiempo en segundos antes de iniciarse un retroceso.

Ciclos fijos de carrera. Se denominan Cajeras (Pockets) a las operaciones de vaciado de formas cerradas. Pueden ser Cajeras Rectangulares o Cajeras Circulares. En estas operaciones la herramienta no sólo recorre el contorno de la figura sino que además realiza todos los movimientos necesarios para retirar el material comprendido dentro de la figura.

G87 – Cajera Rectangular. El formato del bloque de esta en función es el siguiente:

N4 G87 X/Y/Z+/-4.3 I+/-4.3 J+/-4.3 K+/-4.3 B4.3 C4.3 D4.3 N2

- **X/Y/Z:** Cotas del centro de la cajera.
- **I:** Profundidad total de la cajera. En absolutas respecto al cero pieza, en incrementales respecto al plano de referencia.
- **J:** Distancia en X desde el centro al borde de la cajera.
- **K:** Distancia en Y desde el centro al borde de la cajera.
- **B:** Profundización incremental por pasada.
- **C:** Incremento lateral (Step-over).

Grupo Diseño, Gestión y Desarrollo de Nuevos Productos

- **D:** Distancia entre el PR y la superficie de la pieza.
- **N:** Número de veces que se repetirá el ciclo. Sólo en **G91**.

G88 – Cajera Circular. Tiene el mismo formato de la Cajera Rectangular. Se diferencia en que J define el radio de la Cajera y no se incluye el valor K.

- **D:** Distancia entre el PR y la superficie de la pieza.
- **N:** Número de veces que se repetir el ciclo. Sólo en **G91**.

Otras Funciones. Como se habrá observado en la lista completa de las funciones de programación CNC, existen muchas otras que no han sido explicadas en este apunte. Las mismas corresponden a operaciones de ejecución circunstancial y rara vez son aplicadas. Las funciones explicadas son las de utilización más frecuente.

3.8.5 Funciones utilizadas por los sistemas CAM

Los sistemas CAM aplican solamente 4 funciones: G00, G01, G02 y G03. Eventualmente pueden generar Ciclos Fijos de Taladrado, Roscado, etc. y generar programas con Compensaciones de Herramientas. De hecho un CAM es un programador elemental pero sumamente veloz, mucho más que la programación manual. Si se analizan las 100 funciones de la lista se puede concluir que la gran mayoría tienen la función de aliviar la tarea de programación manual.

Si bien este curso concluye con el aprendizaje de la operatoria de sistemas CAM se considera que, para alcanzar los objetivos propuestos, el alumno debe contar con una base mínima de conocimientos de programación manual.

3.9 Sistemas WOP

WOP es el acrónimo de “**Workshop Oriented Programming**” que traducido significa “**Programación Orientada al Taller**”.

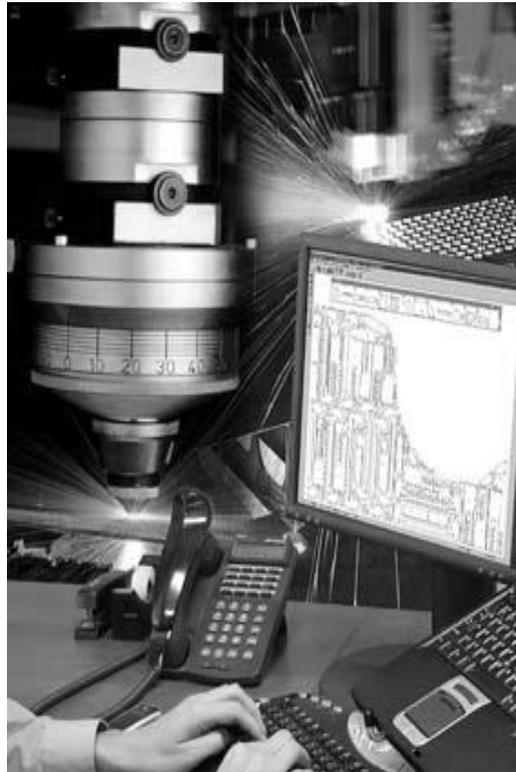
Simplemente, a fines de dar a conocer esta tecnología, podemos decir que, además de las potentes herramientas y sistemas CAM que permiten desarrollar trabajos y piezas muy complejas existen los sistemas WOP como una alternativa para situaciones más sencillas.

Son sistemas de fácil utilización, con una funcionalidad CAD limitada, que corren sobre ordenadores personales conectados directamente con el control CNC pensados para ser usados en un taller por los propios operarios de las máquinas.

En el momento de calcular las primeras sendas éstas se envían directamente en tiempo real al control. El usuario puede preparar todos los programas de mecanizado que desee y ponerlos en una cola de trabajo para que se realicen uno por uno.

CAPITULO IV

Sistemas CAD-CAM



4. SISTEMA CAD/CAM

En los capítulos 1 y 3 definimos los conceptos, características y prestaciones de los sistemas CAD y CAM de manera independiente. Pero desde el punto de vista industrial estas dos concepciones van de la mano ya que, en conjunto, permiten diseñar y confeccionar productos tan dispares como edificios, puentes, carreteras, aviones, barcos, coches, cámaras digitales, teléfonos móviles, ropa u obras de arte.

Es por esto que en esta sección hablaremos de los CAD y CAM como sistemas relacionados.

4.1 Historia y evolución del CAD/CAM

En la historia del CAD/CAM se pueden encontrar precursores de estas técnicas en dibujos de civilizaciones antiguas como Egipto, Grecia o Roma. Los trabajos de Leonardo da Vinci muestran técnicas CAD actuales como el uso de perspectivas. Sin embargo el desarrollo de estas técnicas está ligado a la evolución de los ordenadores que se produce a partir de los años 50.

A principios de la década de 1950 aparece la primera pantalla gráfica en el Instituto de Tecnología de Massachusetts, **MIT**, capaz de representar dibujos simples de forma no interactiva. En esta época, y también en el MIT, se desarrolla el concepto de programación de control numérico. A mediados de esta década aparece el lápiz óptico que supone el inicio de los gráficos interactivos y a finales del mismo período aparecen las primeras máquinas herramienta y General Motors comienza a usar técnicas basadas en el uso interactivo de gráficos para sus diseños.

La década de los 60 representa un periodo crucial para el desarrollo de los gráficos por ordenador. Aparece el termino CAD y varios grupos de investigación dedican gran esfuerzo a estas técnicas. Fruto del mismo es la aparición de unos pocos sistemas de CAD. Un hecho determinante de este período es la aparición comercial de pantallas de ordenador.

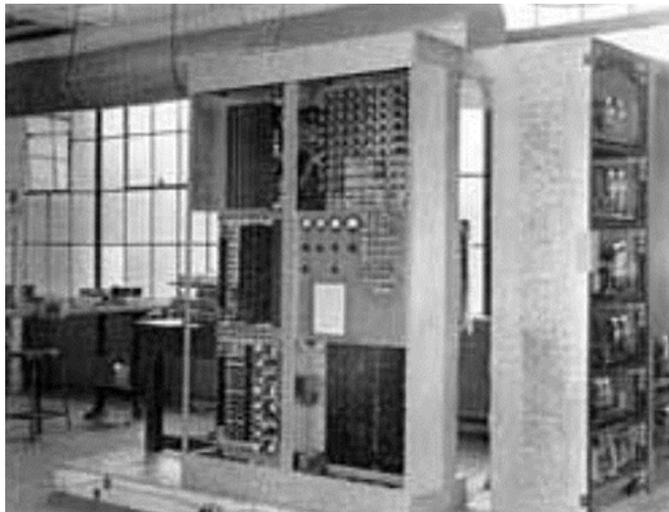


Fig.4.1. Ordenador fabricado en 1949 en el MIT.

En la década de los 70 se consolidan las investigaciones anteriores y la industria se percata del potencial del uso de estas técnicas, lo que lanza definitivamente la implantación y uso de estos sistemas limitados por la capacidad de los ordenadores de esta época. Aparecen los primeros sistemas 3D (prototipos), sistemas de modelado de elementos finitos, control numérico, etc.

En la década de los 80 se generaliza el uso de las técnicas CAD/CAM propiciada por los avances en hardware y la aparición de aplicaciones en 3D capaces de manejar superficies complejas y modelado sólido. Aparecen multitud de aplicaciones en todos los campos de la industria que usan técnicas de CAD/CAM y se empieza a hablar de realidad virtual.

La década de los 90 se caracteriza por una automatización cada vez más completa de los procesos industriales en los que se va generalizando la integración de las diversas técnicas de diseño, análisis, simulación y fabricación. La evolución del hardware y las comunicaciones hacen posible que la aplicación de técnicas CAD/CAM esté limitada tan sólo por la imaginación de los usuarios. En la actualidad el uso

Grupo Diseño, Gestión y Desarrollo de Nuevos Productos

de estas técnicas ha dejado de ser una opción dentro del ámbito industrial para convertirse en la única alternativa existente. Podemos afirmar por tanto que el CAD/CAM es una tecnología de supervivencia. Sólo aquellas empresas que lo usan de forma eficiente son capaces de mantenerse en un mercado cada vez más competitivo.

A modo de resumen, la tabla siguiente muestra algunos de los hechos más relevantes de la evolución del CAD/CAM.

Tabla 4.1. Resumen de la evolución de los sistemas CAD-CAM

Años 50 y 60	<p>Un ordenador ocupa una habitación y cuesta cientos de millones.</p> <p>Primera pantalla gráfica en el MIT.</p> <p>Concepto de programación de control numérico.</p> <p>Primeras máquinas herramienta.</p> <p>Cada compañía desarrolla su propio y peculiar sistema de CAD.</p> <p>Lápiz óptico: inicio de los gráficos interactivos.</p> <p>Aparición comercial pantallas de ordenador.</p> <p>Utilizado por la industria del automóvil, aeronáutica y compañías muy grandes.</p>
Años 70	<p>Los minicomputadores son <i>cabinas</i> y cuestan unos pocos millones.</p> <p>Aparecen los primeros sistemas 3D (prototipos).</p> <p>Potencia de los sistemas limitada, modelado de elementos finitos, control numérico.</p> <p>Aparecen empresas como Computervision o Applicon.</p> <p>Celebración del primer SIGGRAPH y aparición de IGES.</p> <p>El precio de los sistemas CAD en estos años finales de los 70 rondaba los 125.000 US\$</p>
Principios 80	<p>Incremento de potencia (32 bits).</p> <p>Se extiende la funcionalidad de las aplicaciones CAD.</p> <p>Superficies complejas y modelado sólido.</p> <p>Los sistemas de CAD son caros todavía.</p>
Finales 80	<p>Nace Autocad y los PC's.</p> <p>Menor precio y mayor funcionalidad de los sistemas.</p> <p>Los sistemas potentes están basados en estaciones Unix.</p> <p>El mercado del CAD se generaliza en las empresas.</p>

Principios 90	<p>Automatización completa procesos industriales</p> <p>Integración técnicas diseño, análisis, simulación y fabricación</p> <p>Tecnología de supervivencia</p> <p>Estaciones PC</p> <p>Nuevas funcionalidades: modelado sólido, paramétrico, restricciones</p>
<p>Finales 90 - Siglo XXI</p>	<p>Internet e Intranets lo conectan todo.</p> <p>El precio del Hardware cae.</p> <p>La potencia aumenta.</p> <p>Gran cantidad de aplicaciones.</p>

4.2 Componentes del CAD/CAM

Los fundamentos de los sistemas de CAD y CAM son muy amplios, abarcando múltiples y diversas disciplinas, entre las que cabe destacar las siguientes:

- **Modelado geométrico.** Se ocupa del estudio de métodos de representación de entidades geométricas según las formas de modelado existentes.
- **Técnicas de visualización.** Son esenciales para la generación de imágenes del modelo. Los algoritmos usados dependerán del tipo de este, pudiendo variar desde simples técnicas de dibujo 2D para el esquema de un circuito hasta la visualización realista usando trazado de rayos o radiosidad para el estudio de la iluminación de un edificio o una calzada. Además se suelen usar técnicas específicas para la generación de la documentación (generación de curvas de nivel, secciones, representación de funciones sobre sólidos o superficies).
- **Técnicas de interacción gráfica.** Son el soporte de la entrada de información geométrica del sistema de Diseño. Entre éstas las técnicas de posicionamiento y selección poseen una especial relevancia. Las primeras se utilizan para la introducción de posiciones 2D o 3D. Las segundas permiten la identificación interactiva de un componente del modelo, son por tanto esenciales para la edición.
- **Diseño de la interfaz de usuario.** Uno de los aspectos más importante del diseño de una herramienta CAD es la creación de una buena interfaz de usuario.
- **Bases de datos.** Es el soporte para almacenar la información de los modelos que se diseñen. El diseño de bases de datos para sistemas CAD plantea una serie de problemas específicos por la naturaleza de la información y por las necesidades de cambio de la estructura con la propia dinámica del sistema.
- **Métodos numéricos:** Son la base de los métodos de cálculo empleados para realizar las aplicaciones de análisis y simulación típicas de los sistemas de CAD/CAM.
- **Conceptos de fabricación:** Referentes a máquinas, herramientas y materiales, necesarios para entender y manejar ciertas aplicaciones de fabricación y en especial la programación de control numérico.
- **Interfaz de comunicaciones:** Necesarios para interconectar todos los sistemas, dispositivos y máquinas de un sistema CAD/CAM.

En síntesis:

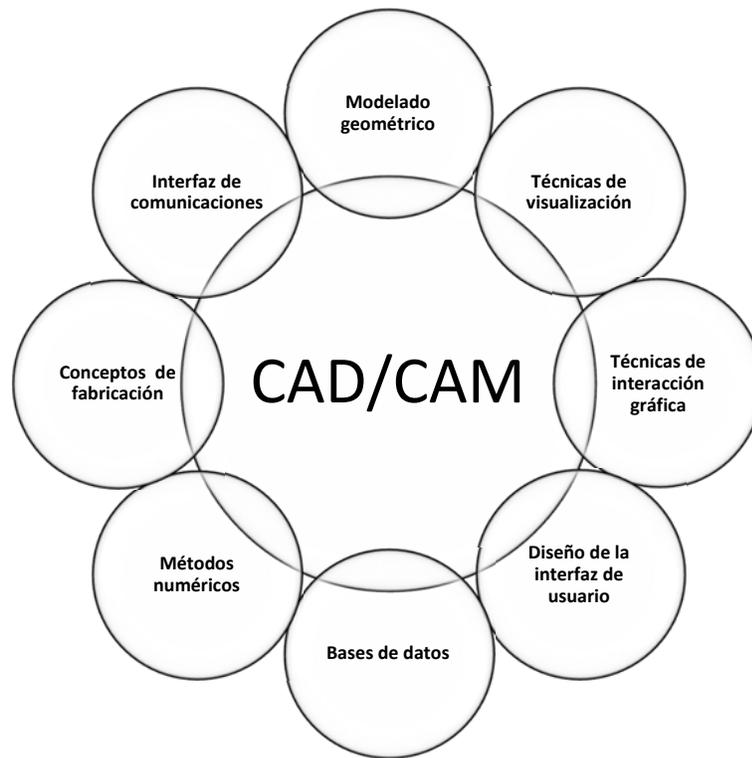


Fig.4.2. Elementos e interrelaciones de los sistemas CAD/CAM.

4.3 El CAD/CAM desde el punto de vista industrial.

Históricamente el CAD/CAM es una tecnología (tanto hardware como software) guiada por la industria. Las producciones aeroespacial, de automoción y naval, principalmente, han contribuido al desarrollo de estas técnicas. Por lo tanto el conocimiento de cómo se aplican las técnicas CAD/CAM en este campo es fundamental para la comprensión de las mismas.

La mayoría de las aplicaciones incluyen diferentes módulos entre los que están modelado geométrico, herramientas de análisis, de fabricación y módulos de programación que permiten personalizar el sistema.

Repasando un poco lo antes dicho las herramientas de modelado geométrico realizan funciones tales como transformaciones geométricas, planos y documentación, sombreado, coloreado y uso de niveles. Las herramientas de análisis incluyen cálculos de masas, análisis por elementos finitos, análisis de tolerancias, modelado de mecanismos y detección de colisiones. Una vez que el modelado se completa se realizan los planos y la documentación con lo que el trabajo queda listo para pasar a la fase de CAM en la que se realizan operaciones tales como planificación de procesos, generación y verificación de trayectorias de herramientas, inspección y ensamblaje.

El esquema del sistema CAD/CAM en la industria será parecido al siguiente:

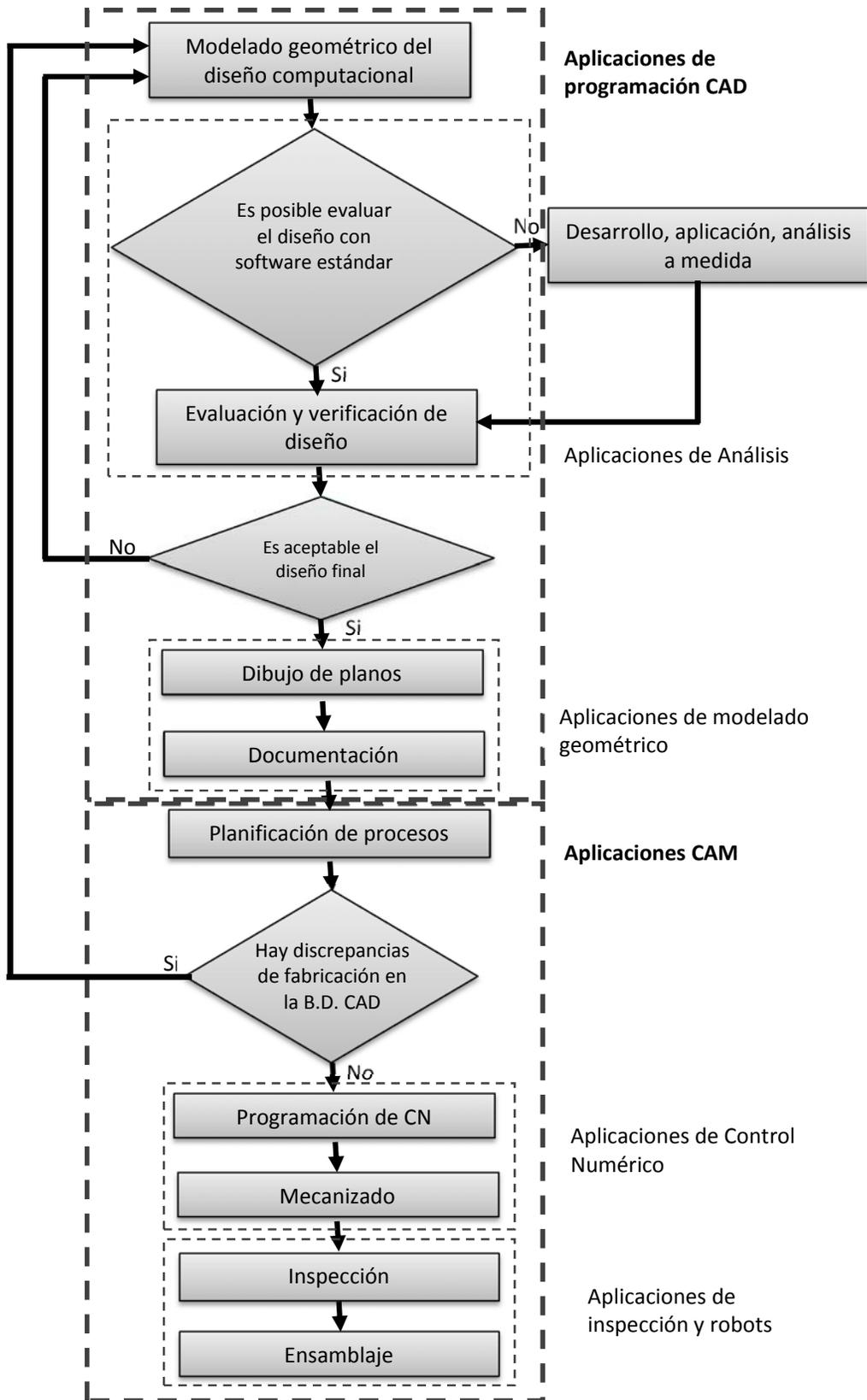


Fig.4.3. Esquema de funcionamiento de un sistema CAD/CAM

CAPITULO V

Sistemas CAE



5. SISTEMAS CAE

5.1 Definición del sistema CAE

Las siglas **CAE** son el acrónimo de **“Computer Aided Engineering”** o **“Ingeniería asistida por Computadora”** en español. También es conocida como **“Elaboración Virtual de Prototipos”** o **“Virtual Prototyping”** debido a que permite simular el comportamiento de la pieza de forma virtual.

El sistema CAE se basa en el uso de software computacionales para simular desempeño y así poder hacer mejoras a los diseños de productos o bien apoyar a la resolución de problemas de ingeniería para una amplia gama de industrias. Esto incluye la simulación, validación y optimización de productos, procesos y herramientas de manufactura.

Las aplicaciones CAE abarcan una gran variedad de disciplinas y fenómenos de la ingeniería permitiendo responder a algunos problemas que requieren la simulación de fenómenos múltiples.

5.2 Interacción CAD/CAE

En el sistema CAE se agrupan habitualmente tópicos tales como los del CAD y la creación automatizada de dibujos y documentación. El sistema CAE es la tecnología que se ocupa de analizar las geometrías generadas por las aplicaciones de CAD, permitiendo al diseñador simular y estudiar el comportamiento del producto para refinar y optimizar dicho diseño.

Existen herramientas para un amplio rango de análisis y una gran variedad de disciplinas y fenómenos de la ingeniería incluyendo:

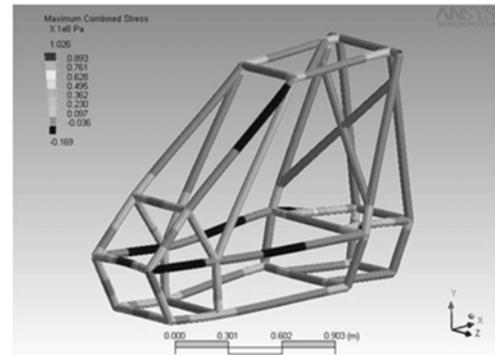


Fig.5.1. Elemento CAD analizado mediante métodos CAE.

- Análisis de estrés y dinámica de componentes y ensambles utilizando el análisis de elementos finitos (FEA).
- Análisis Termal y de fluidos utilizando dinámica de fluidos computacional (CFD).
- Análisis de Cinemática y de dinámica de mecanismos (Dinámica multicuerpos).
- Simulación mecánica de eventos (MES).
- Análisis de control de sistemas.
- Simulación de procesos de manufactura como forja, moldes y troquelados.
- Optimización del proceso del producto.
- Programas de temporización lógica y verificación.

Los programas de cinemática, por ejemplo, pueden usarse para determinar trayectorias de movimiento y velocidades de ensamblado de mecanismos. Los programas de análisis dinámico de (grandes) desplazamientos se usan para determinar cargas y desplazamientos en productos complejos como los automóviles. Las aplicaciones de temporización lógica y verificación simulan el comportamiento de circuitos electrónicos complejos.

Grupo Diseño, Gestión y Desarrollo de Nuevos Productos

Usualmente se trabaja con el método de los elementos finitos, siendo necesario mallar la pieza en pequeños elementos y el cálculo que se lleva a término sirve para determinar las interacciones entre estos elementos. Mediante este método, por ejemplo, se podrá determinar qué grosor de material es necesario para resistir cargas de impacto especificadas en normas, o bien, conservando un grosor, analizar el comportamiento de materiales con distinto límite de rotura.

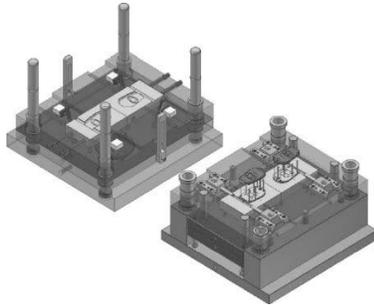


Fig.5.2. Diseño de moldes.

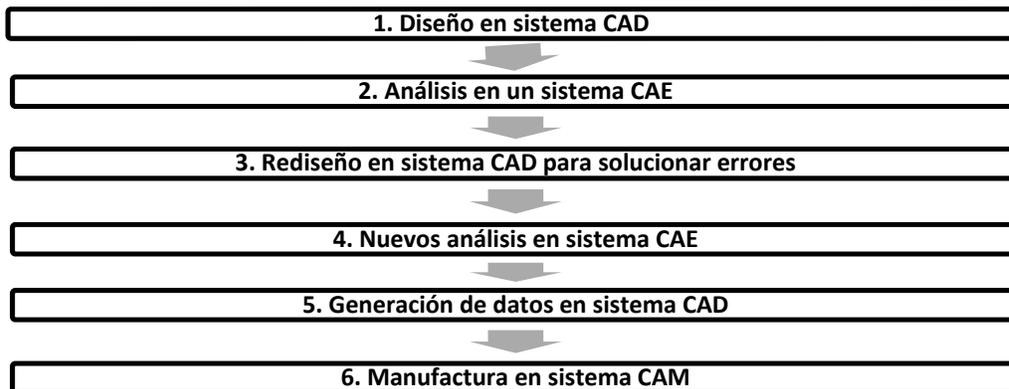
Otra aplicación importante de estos sistemas está en el diseño de moldes y la simulación del llenado de los mismos, a partir de unas dimensiones de éste dadas. También permite realizar el análisis del gradiente de temperaturas durante el llenado.

La realización de todas estas actividades CAE dependerá de las exigencias del diseño y suponen siempre un valor añadido al detectar y eliminar problemas que retrasarían el lanzamiento del producto.

Sin embargo, el concepto de CAE, asociado a la concepción de un producto y a las etapas de investigación y diseño previas a su fabricación, se extiende cada vez más hasta incluir progresivamente a la propia fabricación. Podemos decir, por tanto, que la CAE es un proceso integrado que incluye todas las funciones de la ingeniería que van desde el diseño propiamente dicho, CAD, hasta la fabricación, CAM.

Así pues, CAD, CAM y CAE son tecnologías que tratan de automatizar ciertas tareas del ciclo de producto y hacerlas más eficientes. Dado que se han desarrollado de forma separada, aún no se han conseguido todos los beneficios potenciales de integrar las actividades de diseño y fabricación. Para solucionar este problema ha aparecido una nueva tecnología: la “Fabricación Integrada por Ordenador” o CIM, que trataremos más adelante.

Esquemáticamente el CAD, CAM y CAE interactúan de la siguiente forma:



Cuadro 5.1. Integración CAD/CAM/CAE.

Profundizando un poco más el análisis, la relación podría resumirse esquemáticamente así:

5.3 Beneficios del sistema CAE

Entre los principales beneficios o ventajas que se obtienen de la aplicación de un sistema CAE podemos

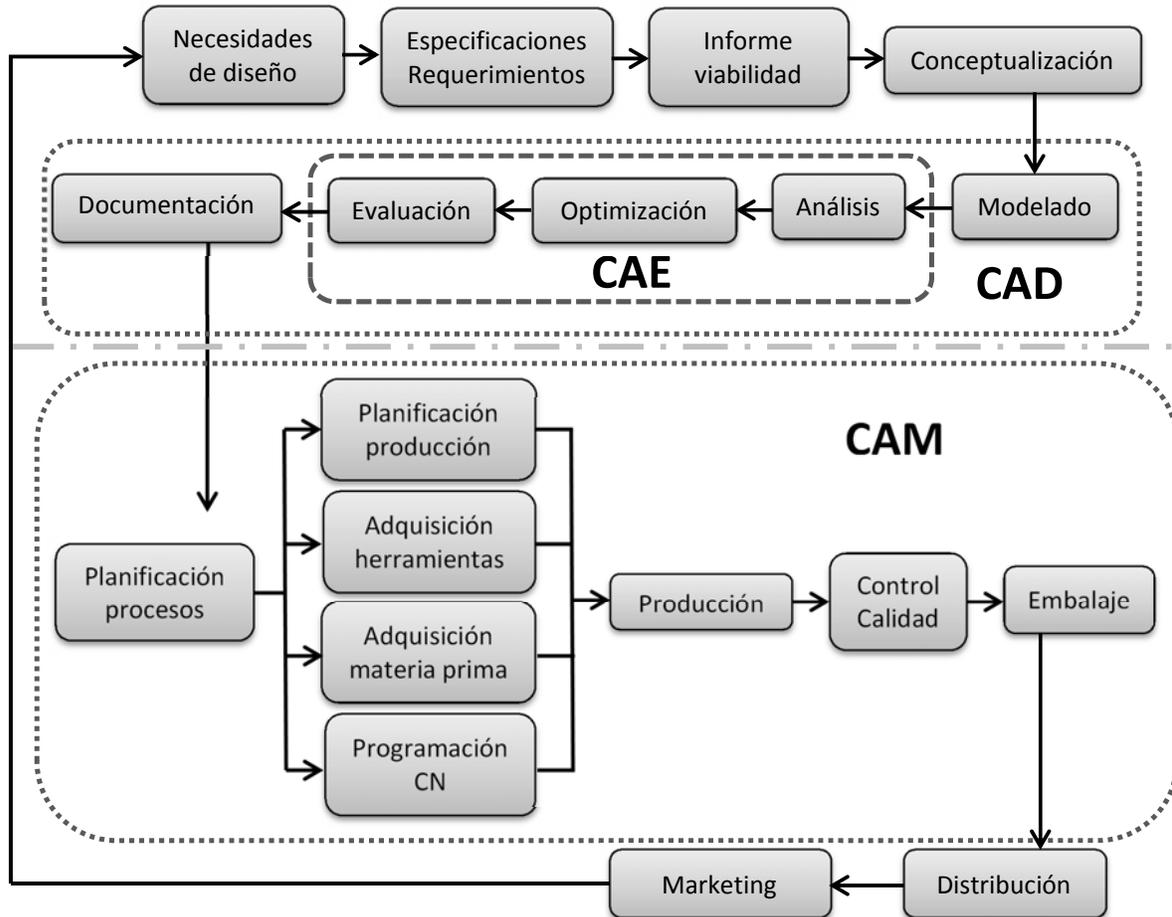


Fig.5.3. Áreas e incumbencias de los sistemas CAD – CAE – CAM.

mencionar:

- Reducción del tiempo y costo de desarrollo de productos con mayor calidad y durabilidad del mismo.
- Las decisiones sobre el diseño se toman con base en el impacto del desempeño del producto en la simulación.
- Los diseños pueden evaluarse y refinarse utilizando simulaciones computarizadas en lugar de hacer pruebas a prototipos físicos ahorrando tiempo y dinero.
- Como consecuencia del punto anterior este sistema permite reducir enormemente la cantidad de prototipos a realizar.
- Rapidez, exactitud y uniformidad en la fabricación.
- Aumento de la productividad y mayor competitividad.
- Brindan conocimientos sobre el desempeño más temprano en el proceso de desarrollo cuando los cambios al diseño son menos costosos de hacer.
- Apoyan a los equipos de ingeniería a administrar riesgos y comprender las implicaciones en el desempeño de sus diseños.
- Los riesgos de fallas disminuyen al identificar y eliminar problemas potenciales.

Grupo Diseño, Gestión y Desarrollo de Nuevos Productos

- Puede facilitar, desde etapas tempranas, la resolución de problemas, lo que puede reducir dramáticamente los costos asociados al ciclo de vida del producto.

5.4 Ejemplos de software CAE

Estos son algunos ejemplos de software CAE:

- SolidWorks Simulation. Este software permite:
 - ✓ **Estudiar el comportamiento de los diseños.** Resolver rápidamente los problemas no lineales debidos a grandes deformaciones y cambios en las condiciones de contorno.
 - ✓ **Analizar diseños realizados con materiales no lineales.** Materiales no lineales tales como caucho, silicona o metales bajo cargas elevadas se comportan de manera diferente a partir de materiales de ingeniería estándar.
 - ✓ **Realizar análisis dinámicos de piezas y ensamblajes.** Análisis de respuesta dinámica debido al tiempo de carga, armónicas y las excitaciones de vibración aleatoria.
 - ✓ **Estudiar la tensión, desplazamiento, velocidad y aceleración** en el tiempo de estudio de valores RMS y PSD para el esfuerzo, desplazamiento, velocidad y aceleración.
 - ✓ **Analizar las capas dentro de composites.** Los materiales compuestos se utilizan en un número creciente de productos que van desde sencillos bienes de consumo a estructuras aeroespaciales avanzadas.
- Pro ENGINEER. Con su gama de potentes funciones de análisis simples de usar, estáticas y dinámicas, permite a los ingenieros desarrollar un diseño más informado a través de pruebas de productos desde el principio del proceso de diseño. Esto mejora la calidad e innovación del mismo. Incluyen la simulación de movimiento dinámico, análisis de estrés lineal y no lineal, análisis de vibración, análisis termal y de flujo de fluidos y análisis para probar la correlación física, entre otras opciones.
- CATIA. Este software acelera los procesos de desarrollo de productos como el diseño relacional y la optimización. Permite a los usuarios crear y analizar los productos más grandes y más complejos, es un solucionador de elementos finitos que analiza estrés, vibración, falla estructural/durabilidad, transferencia de calor, ruido/acústica, y aeroelasticidad.

5.5 Modelo de los Elementos Finitos³

El “**Método de los Elementos Finitos**” es conocido por las siglas **MEF** o **FEM** que provienen del nombre en inglés.

El MEF ha adquirido una gran importancia en la solución de problemas ingenieriles, físicos, mecánicos, etc., ya que permite resolver casos que hasta hace poco tiempo eran prácticamente imposibles de solucionar por métodos matemáticos tradicionales. Esta circunstancia obligaba a realizar prototipos, ensayarlos e ir realizando mejoras de forma iterativa lo que traía consigo un elevado coste tanto económico como en tiempo de desarrollo.

El MEF permite realizar un modelo matemático de cálculo del sistema real más fácil y económico de modificar que un prototipo. Sin embargo no deja de ser un método aproximado debido a las hipótesis básicas del método. Los prototipos, por lo tanto, siguen siendo necesarios, pero en menor número, ya que el primero puede acercarse bastante más al diseño óptimo.

³ Ver ANEXO D: “Enfoque matemático del Método de los Elementos Finitos”

El método de los elementos finitos como formulación matemática es relativamente nueva pero no así su estructura básica que es conocida desde hace bastante tiempo, en los últimos años ha sufrido un gran desarrollo debido a los avances informáticos. Han sido precisamente estos avances los que han puesto a disposición gran cantidad de programas que permiten realizar cálculos con elementos finitos.

Pero el manejo correcto de este tipo de programas exige un profundo conocimiento no sólo del material con el que se trabaja sino también de los principios del MEF. Sólo con este tipo de análisis estaremos en condiciones de garantizar que los resultados obtenidos se ajustan a la realidad.

5.5.1 Resumen histórico

Cuando se produce la llegada de los primeros ordenadores en la década de los 50's el cálculo de estructuras se encontraba en un punto en el que los métodos de cálculo predominantes consistían en técnicas de iteración (métodos de Cross y Kani) que se realizaban de manera manual y por tanto resultaban bastante tediosos. El cálculo de una estructura de edificación de varios pisos, por ejemplo, podía llevar varias semanas, lo cual suponía un coste sustancial de tiempo en detrimento de la posibilidad de invertir éste en la optimización de la estructura. La llegada de la computadora permitió el resurgimiento del método de los desplazamientos ya conocidos en siglos anteriores (Navier, Lagrange, Cauchy), pero que era difícil de aplicar dado que al final conducía a la resolución de enormes sistemas de ecuaciones inabordables desde el punto de vista manual.

El Método de Elementos Finitos (MEF) fue desarrollado en 1943 por R. Courant, quien utilizó el método Ritz de análisis numérico y minimización de las variables de cálculo para obtener soluciones aproximadas a un sistema de vibración.

Poco después un documento publicado en 1956 por M. J. Turner, R. W. Clough, H. C. Martin, y L. J. Topp estableció una definición más amplia del análisis numérico. El documento se centró en "la rigidez y deformación de estructuras complejas".

Con la llegada de los primeros ordenadores se instaura el cálculo matricial de estructuras. Éste parte de la discretización de la estructura en elementos lineales tipo barra de los que se conoce su rigidez frente a los desplazamientos de sus nodos. Se plantea entonces un sistema de ecuaciones resultado de aplicar las ecuaciones de equilibrio a los nodos de la estructura. Este sistema se esquematiza de la siguiente manera:

$$(P) = [k] * (u),$$

donde las incógnitas son los desplazamientos en los nodos (vector u) que se hallan a partir de las fuerzas en los mismos (vector P) y de la rigidez de las barras (matriz de rigidez k). Conocidos dichos desplazamientos es posible determinar los esfuerzos en las barras. La solución obtenida es exacta.

Para la resolución de los sistemas de ecuaciones se potencia el estudio de la adaptabilidad de los algoritmos ya conocidos (Gauss, Cholesky, Crout, gradiente conjugado, etc.). El ahorro de tiempo es incalculable y con ello el uso del método matricial se extiende. Este desarrollo se hace especialmente notable en estructuras de edificación donde la discretización de los pórticos en barras es prácticamente inmediata a partir de las vigas y pilares.

Sin embargo, y a pesar de desarrollarse modelizaciones de elementos superficiales mediante barras (losas con emparillados, elementos curvos mediante aproximaciones de elementos rectos, etc.), se plantean grandes dificultades ante estructuras continuas (superficies y volúmenes) y con geometrías complejas. De ahí que sea precisamente dentro del campo aeroespacial donde comienzan a desarrollarse las nuevas técnicas del MEF. La demanda de la NASA repercutió en el desarrollo del

Grupo Diseño, Gestión y Desarrollo de Nuevos Productos

software de elementos finitos NASTRAN en 1965. Dada su generalidad el método se amplió a otros campos no estructurales como la conducción de calor, la mecánica de fluidos, etc.

Con la llegada de los centros de cálculo y los primeros programas comerciales en los años 60, el MEF se populariza en la industria a la vez que refuerza sus bases teóricas en los centros universitarios.

En los años 70 se produce un gran crecimiento de la bibliografía así como la extensión del método a otros problemas como los no lineales. En esta década el MEF estaba limitado a caros ordenadores centrales generalmente poseídos por las industrias aeronáuticas, de automoción, de defensa y nucleares. Se estudian nuevos tipos de elementos y se sientan las bases matemáticas rigurosas del método que había aparecido antes como técnica de la ingeniería que como método numérico de la matemática.

Por último, a partir de la década de los 80, con la generalización de los ordenadores personales se extiende el uso de los programas comerciales que se especializan en los diversos campos instaurándose el uso de pre y postprocesadores gráficos que realizan el mallado y la representación

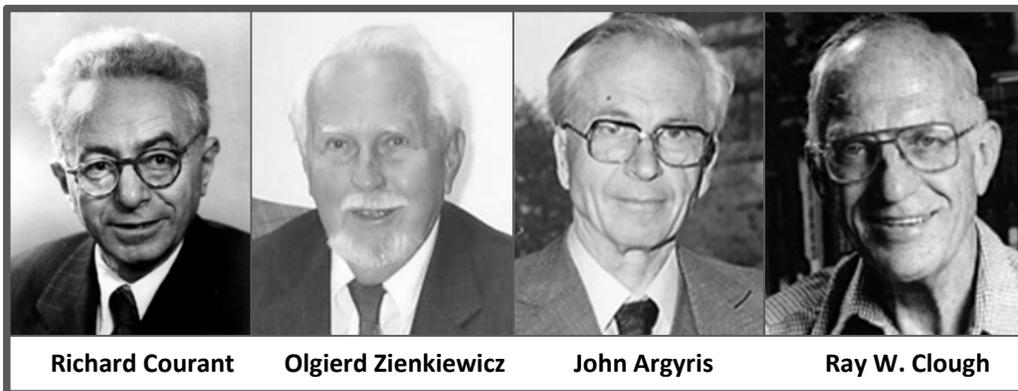


Fig.5.4. Precursores del MEF.

gráfica de los resultados. Se continúa en el estudio de la aplicación del método a nuevos modelos de comportamiento (plasticidad, fractura, daño continuo, etc.) y en el análisis de los errores. En la actualidad, dentro del campo estructural, el MEF comparte protagonismo con el método matricial, siendo muchos los programas que mezclan el análisis por ambos métodos debido sobre todo a la mayor necesidad de memoria que requiere el análisis por elementos finitos. De este modo se ha dejado la aplicación del MEF para el análisis de elementos continuos tipo losa o pantalla, mientras que los pórticos siguen todavía discretizándose en barras y utilizando el método matricial. Desde el rápido declive en el coste de los ordenadores y el fenomenal incremento en la potencia de cálculo, el MEF ha desarrollado una increíble precisión. Al día de hoy los superordenadores son capaces de dar resultados exactos para todo tipo de parámetros.

5.5.2 Estados del arte – MEF

Los programas de MEF (método de elementos finitos) permiten obtener soluciones aproximadas de problemas que sean susceptibles de ser representados por un sistema de ecuaciones diferenciales.

En Ingeniería la mayoría de los procesos están definidos de esta forma, por lo que dichos programas permitirán obtener productos de calidad superior a un menor coste, mejorar procesos existentes, estudiar el fallo de un componente estructural o un equipo, entre otros.

La utilización de un programa MEF puede ayudar a reducir el tiempo total de desarrollo de un

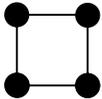
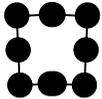
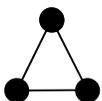
producto disminuyendo el número de ciclos prototipo-pruebas, ensayos-evaluación. Además en algunos casos no es deseable o práctico el realizar un prototipo: aplicaciones biomecánicas, aeroespaciales, etc. En la actualidad existen numerosos programas de análisis por elementos finitos tales como: SOLIDWORKS, SIMULATION, ABAQUS, ANSYS, PATRAN, NASTRAN, STRUDL, CAEPIPE, SANCEF, HYPERMESH, RAM-SERIES, etc.

5.5.3 Conceptos generales del método

La idea general del método de los elementos finitos es la división de un continuo sobre el que están definidas ciertas ecuaciones integrales que caracterizan el comportamiento físico del problema en un conjunto de pequeños elementos (denominados elementos finitos) interconectados por una serie de puntos llamados nodos. Dos nodos son adyacentes si pertenecen al mismo elemento finito; además un nodo sobre la frontera de un elemento finito puede pertenecer a varios elementos. El conjunto de nodos considerando sus relaciones de adyacencia se llama "malla". Las ecuaciones que rigen el comportamiento del continuo regirán también el del elemento.

De esta forma se consigue pasar de un sistema continuo (infinitos grados de libertad) que es regido por una ecuación diferencial o un sistema de ecuaciones diferenciales, a un sistema con un número de grados de libertad finito cuyo comportamiento se modela por un sistema de ecuaciones, lineales o no.

Tabla 5.1. Elementos de discretización más utilizados en el análisis MEF.

Tipos de elementos más comunes en el MEF	
	Elemento cuadrilátero de 4 nodos
	Elemento cuadrilátero de 8 nodos
	Elemento triangular de 3 nodos

En cualquier sistema a analizar podemos distinguir entre:

- **Dominio.** Espacio geométrico donde se va a analizar el sistema.
- **Condiciones de contorno.** Variables conocidas y que condicionan el cambio del sistema: cargas, desplazamientos, temperaturas, voltaje, focos de calor,...

Grupo Diseño, Gestión y Desarrollo de Nuevos Productos

- **Incógnitas.** Variables del sistema que deseamos conocer después que las condiciones de contorno han actuado sobre el mismo: desplazamientos, tensiones, temperaturas,...

Los cálculos se realizan sobre la malla o discretización creada a partir del dominio con

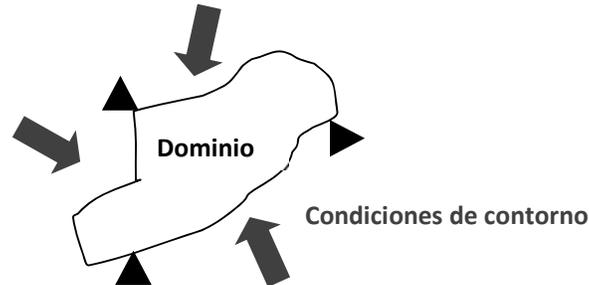


Fig.5.5. Elementos generales de los sistemas a analizar.

programas generadores de esta en una etapa previa a los cálculos que se denomina pre-proceso. De acuerdo con estas relaciones de adyacencia o conectividad se vincula el valor de un conjunto de variables incógnitas definidas en cada nodo denominadas grados de libertad. El conjunto de relaciones entre el valor de una determinada variable entre los nodos se puede escribir en forma de sistema de ecuaciones lineales (o linealizadas). La matriz del mismo se llama matriz de rigidez del sistema. El número de ecuaciones es proporcional al número de nodos.

Típicamente el método de los elementos finitos se programa computacionalmente para calcular el campo de desplazamientos y posteriormente, a través de relaciones cinemáticas y constitutivas, las deformaciones y tensiones respectivamente cuando se trata de un problema de mecánica de sólidos deformables o más generalmente un problema de mecánica de medios continuos. El método de los elementos finitos es muy utilizado debido a su generalidad y a la facilidad de introducir dominios de cálculo complejos (en dos o tres dimensiones). Además el método es fácilmente adaptable a problemas de transmisión de calor, de mecánica de fluidos para calcular campos de velocidades y presiones (mecánica de fluidos computacional, CFD) o de campo electromagnético. Dada la imposibilidad práctica de encontrar la solución analítica a estos problemas, con frecuencia en la práctica ingenieril los métodos numéricos, y en particular los elementos finitos, se convierten en la única alternativa práctica de cálculo.

5.5.4 Forma de aplicar el método

El MEF es, básicamente, un método numérico de resolución de ecuaciones diferenciales. Lo que hace el sistema es convertir un problema definido en términos de esas ecuaciones diferenciales en un problema de forma matricial, que proporciona el resultado correcto para un número finito de puntos e interpola posteriormente la solución al resto del dominio.

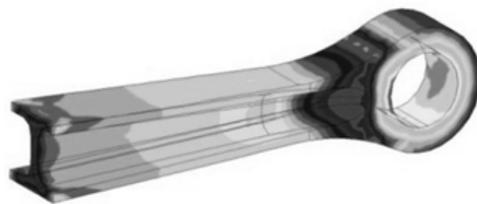


Fig.5.6. Ejemplo de aplicación del MEF.

El resultado obtenido por MEF coincide con la solución exacta sólo en un número finito de puntos llamados nodos. En el resto de puntos, que no son nodos, la solución aproximada se obtiene interpolando a partir de los resultados obtenidos para los nodos.

El conjunto de nodos forma una red y, como dijimos anteriormente, constituyen un a mallado formado por retículos. Cada uno de los mismos contenidos en dicha malla es un "elemento finito".

Básicamente los pasos a seguir en el análisis de estructuras mediante el método de los

desplazamientos a través del MEF son:

1. El continuo se divide mediante líneas o superficies imaginarias en un número de elementos finitos. Esta parte del proceso se desarrolla habitualmente mediante algoritmos incorporados a programas informáticos de mallado durante la etapa de Pre-proceso.
2. Se supone que los elementos están conectados entre sí mediante un número discreto de puntos o “nodos” situados en sus contornos. Los desplazamientos de estos nodos serán las incógnitas fundamentales del problema, tal y como ocurre en el análisis simple de estructuras por el método matricial.
3. Se toma un conjunto de funciones que definan de manera única el campo de desplazamientos dentro de cada “elemento finito” en función de los desplazamientos nodales de dicho elemento.

Por ejemplo el campo de desplazamientos dentro de un elemento lineal de dos nodos viene definido por:

$$u = N_1 * u_1 + N_2 * u_2,$$

siendo N_1 y N_2 las funciones comentadas (funciones de forma) y u_1 y u_2 los desplazamientos en los nodos 1 y 2.

4. Estas funciones de desplazamientos definirán entonces de manera única el estado de deformación del elemento en función de los desplazamientos nodales. Estas deformaciones, junto con las propiedades constitutivas del material, definirán a su vez el estado de tensiones en todo el elemento, y por consiguiente en sus contornos.
5. Se determina un sistema de fuerzas concentradas en los nodos tal que equilibre las tensiones en el contorno y cargas repartidas resultando así una relación entre fuerzas y desplazamientos de la forma $F = k u$, que como puede comprobarse es similar a la del cálculo matricial.
6. La resolución del sistema anterior permite obtener los desplazamientos en los nodos y con ellos definir de manera aproximada el campo de desplazamientos en el elemento finito.
7. En la etapa de post-proceso se presentan los resultados, generalmente de forma gráfica para su análisis.

Estos siete pasos representan las bases desde un punto de vista interno referido al cálculo (es decir, la base del MEF), pero por otro lado se puede decir que existen tres fases a la hora de realizar un análisis por elementos finitos que se enumeran a continuación:

- **Preproceso y generación de la malla.**
- **Cálculo.**
- **Postproceso.**

Preproceso y generación de la malla. La malla, en general, consta de miles de puntos. La información sobre las propiedades del material y otras características del problema se almacena junto con la información que la describe.

Por otro lado las cargas que se le aplican al sistema (por ej.: presión, flujos o cargas térmicas, cargas

Grupo Diseño, Gestión y Desarrollo de Nuevos Productos

puntuales y de gravedad, estáticas y dinámicas, desplazamientos forzados, etc.) se reasignan a los nodos de la malla.

Así también a los puntos del mallado se les asigna una densidad por todo el material dependiendo del nivel de la tensión mecánica u otra propiedad. Las regiones que recibirán gran cantidad de tensión tienen normalmente una mayor densidad de nodos (densidad de malla) que aquellos que experimentan poco o ninguno.

Los puntos del sistema estudiado que generarán mayor interés consisten en puntos de fractura previamente probados del material, entrantes, esquinas, detalles complejos, y áreas de elevada tensión.

Las tareas asignadas al preproceso son:

1. El continuo se divide mediante líneas o superficies imaginarias en un número de elementos finitos. Esta parte del proceso se desarrolla habitualmente mediante algoritmos incorporados a programas informáticos de mallado.
2. Se supone que los elementos están conectados entre sí mediante un número discreto de puntos o “nodos” situados en sus contornos. Los desplazamientos de estos nodos serán las incógnitas fundamentales del problema.
3. Se toma un conjunto de funciones que definan de manera única el campo de desplazamientos dentro de cada “elemento finito” en función de los desplazamientos nodales del mismo. Estas funciones de desplazamientos definirán entonces de manera única el estado de deformación del elemento en función de los desplazamientos nodales. Estas deformaciones, junto con las propiedades constitutivas del material, definirán a su vez el estado de tensiones en todo el elemento, y por consiguiente en sus contornos.
4. Se determina un sistema de fuerzas concentradas en los nodos tal que equilibre las tensiones en el contorno y cualesquiera cargas repartidas, resultando así una relación entre fuerzas y desplazamientos.

Cálculo y resolución de sistemas de ecuaciones. En un problema mecánico lineal no dependiente del tiempo, el cálculo generalmente se reduce a obtener los desplazamientos en los nodos y con ellos definir de manera aproximada el campo de desplazamientos en el elemento finito.

Cuando el problema es no-lineal en general la aplicación de las fuerzas requiere la aplicación incremental de las fuerzas y calcular en cada incremento algunas magnitudes referidas a los nodos. Algo similar sucede con los problemas dependientes del tiempo para los que se considera una sucesión de instantes, en general bastante cercanos en el tiempo, y se considera el equilibrio instantáneo en cada uno. En general estos dos últimos tipos de problemas requieren un tiempo de cálculo substancialmente más elevado que en otro estacionario y lineal.

Postproceso. Actualmente el MEF es usado para calcular problemas tan complejos que los ficheros que se generan como resultado tienen tal cantidad de datos que resulta conveniente procesarlos de alguna manera adicional para hacerlos más comprensibles e ilustrar diferentes aspectos del problema para poder así extraer conclusiones. El post-proceso del MEF generalmente requiere software adicional para organizar los datos de salida.



Cuadro 5.2. Etapas en el desarrollo del análisis MEF.

5.5.5 Tipos de análisis ingenieriles

El programador puede insertar numerosos algoritmos o funciones que pueden hacer al sistema comportarse de manera lineal o no lineal. Los sistemas lineales son menos complejos y normalmente no tienen en cuenta deformaciones plásticas. Los sistemas no lineales toman en cuenta las deformaciones plásticas, y algunos incluso son capaces de verificar si se presentaría fractura en el material.

Algunos tipos de análisis ingenieriles comunes que usan el método de los elementos finitos son:

- **Análisis estático:** se emplea cuando la estructura está sometida a acciones estáticas, es decir, no dependientes del tiempo.
- **Estudio de pandeo y frecuencia:** El análisis de pandeo y de frecuencia permite evaluar frecuencias naturales o cargas críticas de pandeo, así como los modos de vibración de sus componentes estructurales o sistemas de soporte. El análisis de frecuencias, también conocido como análisis modal o dinámico, calcula las frecuencias resonantes (naturales) y las correspondientes formas modales. El análisis de pandeo calcula los factores de carga (crítica) de pandeo y los modos de pandeo correspondientes.

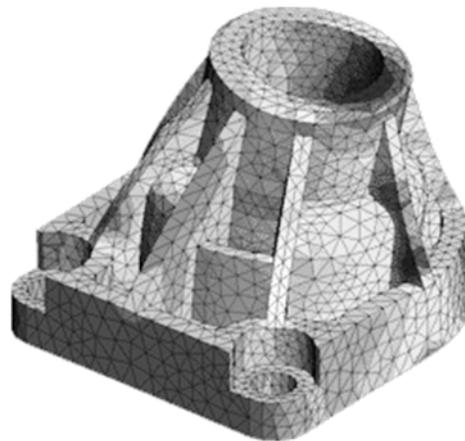


Fig.5.7. Análisis de cargas

- **Análisis de vibraciones:** es usado para analizar la estructura sometida a vibraciones aleatorias, choques e impactos. Cada una de estas acciones puede actuar en la frecuencia natural de la estructura y causar resonancia y el consecuente fallo.
- **Análisis de fatiga:** ayuda a los diseñadores a predecir la vida del material o de la estructura prediciendo el efecto de los ciclos de carga sobre el espécimen. Este análisis puede mostrar las áreas donde es más probable que se presente una grieta. El análisis por fatiga puede también predecir la tolerancia al fallo del material.
- **Estudio de caída:** permite simular el comportamiento de un modelo de pieza o ensamblaje bajo las condiciones de choque producidas por un impacto. Se evalúa el efecto del impacto sobre el modelo cuando cae de una altura determinada o es proyectado sobre una superficie fija e inmóvil a una velocidad específica.



Fig.5.8. Análisis de transferencia de calor.

- **Análisis de transferencia de calor** por conductividad o por dinámicas térmicas de flujo del material o la estructura. El estado continuo de transferencia se refiere a las propiedades térmicas en el material que tiene una difusión lineal de calor.
- **Análisis de flujo de Fluidos:** estudian los modelos para diferentes tipos de fluidos, desde gases a líquidos, con comportamientos lineales y no lineales y su movimiento e interacción con las estructuras sólidas. Es un campo muy amplio de difícil resolución por las diferentes alternativas que se presentan.
- **Análisis de modelos dinámicos:** Estos modelos pueden ser lineales y no lineales, permitiendo resolver problemas más complejos que los estructurales estáticos.
- **Análisis en bioingeniería:** Son modelos que nos permiten predecir el comportamiento de los sistemas biológicos y diseñar los componentes adecuados obteniendo nuevos desarrollos en prótesis, órganos artificiales, etc.

5.5.6 Problemas termodinámicos sujetos a análisis por MEF

Un amplio rango de funciones objetivos (variables con el sistema) está disponible para su caracterización:

- Masa, volumen, temperatura.
- Energía tensional, estrés tensional.
- Fuerza, desplazamiento, velocidad, aceleración.
- Sintético (definidos por el usuario).

Hay múltiples condiciones de carga que se pueden aplicar al sistema. Algunos ejemplos son:

- Estáticas: Puntual, presión, térmica, gravedad y carga centrífuga.
- Cargas térmicas de soluciones del análisis de transmisión de calor.
- Desplazamientos forzados.
- Flujo de calor y convección.
- Dinámicas: Puntuales, presión y cargas de gravedad.

Cada programa MEF suele incluir una librería de elementos. Algunos ejemplos de elementos son:

- Elementos tipo barra.
- Elementos tipo viga.
- Placa/Cáscara/Elementos compuestos.
- Panel de sándwich.
- Elementos sólidos.
- Elementos tipo muelle.
- Elementos de masa.
- Elementos rígidos.
- Elementos amortiguadores viscosos.

Muchos programas MEF también están equipados con la capacidad de trabajar con múltiples materiales en la estructura, tales como:

- Isotrópicos, homogéneos.
- Ortotrópicos, idénticos a 90 grados.

5.5.7 Ventajas y limitaciones del MEF

Entre las **ventajas** más importantes de este sistema encontramos:

- Solución para la tarea de predecir los fallos debidos a tensiones desconocidas enseñando los problemas de la distribución de tensiones en el material y permitiendo a los diseñadores ver todas las tensiones involucradas.
- Este método de diseño y prueba del producto es mejor al ensayo y error en donde hay que mantener costos de manufactura asociados a la construcción de cada ejemplar para las pruebas.
- Hace posible el cálculo de estructuras que, por el gran número de operaciones que su resolución presenta o por lo tedioso de las mismas, en la práctica son inabordables mediante el cálculo manual.
- En la mayoría de los casos reduce a límites despreciables el riesgo de errores operativos.

Por otro lado, las **limitaciones** que presenta actualmente son:

- Calcula soluciones numéricas concretas y adaptadas a unos datos particulares de entrada, no puede hacerse un análisis de sensibilidad sencillo que permita conocer cómo variará la solución si alguno de los parámetros se altera ligeramente.
- Si bien algunos tipos de problemas permiten acotar el error de la solución, debido a los diversos tipos de aproximaciones que usa el método, los problemas no-lineales o dependientes del tiempo en general no permiten conocerlo.
- La mayoría de las aplicaciones prácticas requieren mucho tiempo para ajustar detalles de la geometría, existiendo frecuentemente problemas de mal condicionamiento de las mallas.
- En general una simulación requiere el uso de numerosas pruebas y ensayos con geometrías simplificadas o casos menos generales que el que finalmente pretende simularse antes de empezar a lograr resultados satisfactorios.

5.5.8 Ejemplos de aplicación

- Estudio de flujos de fluidos y cargas térmicas

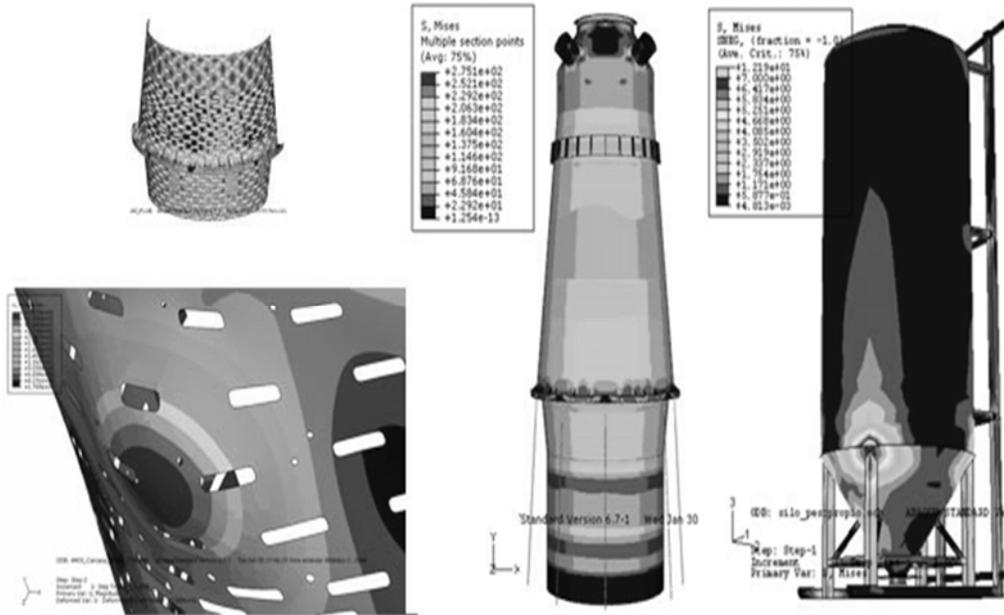


Fig.5.9. Estudio de cargas térmicas en quemadores y recipientes a presión.

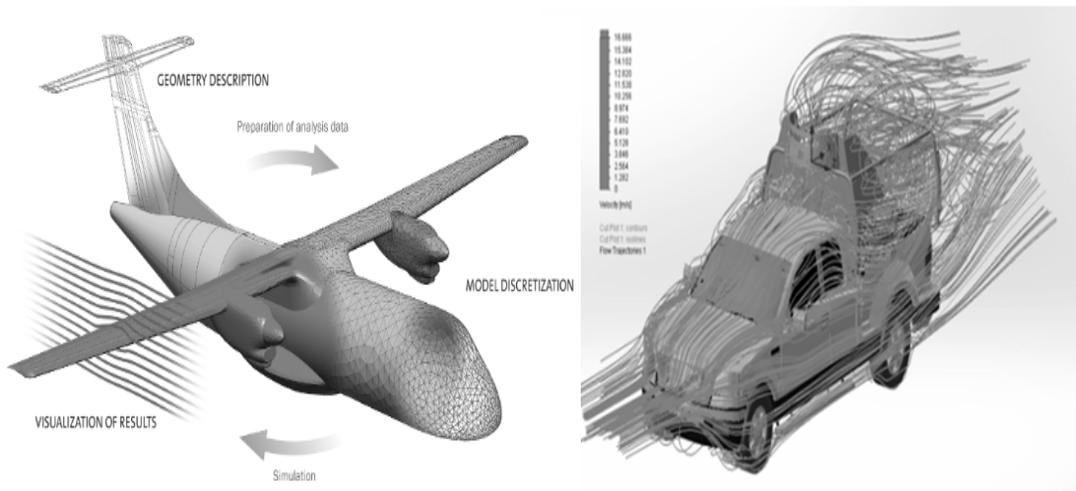


Fig.5.10. Análisis de flujos de fluidos en las industrias aeronáutica y automotriz.

- **Análisis de estructuras – Problemas estáticos lineales**

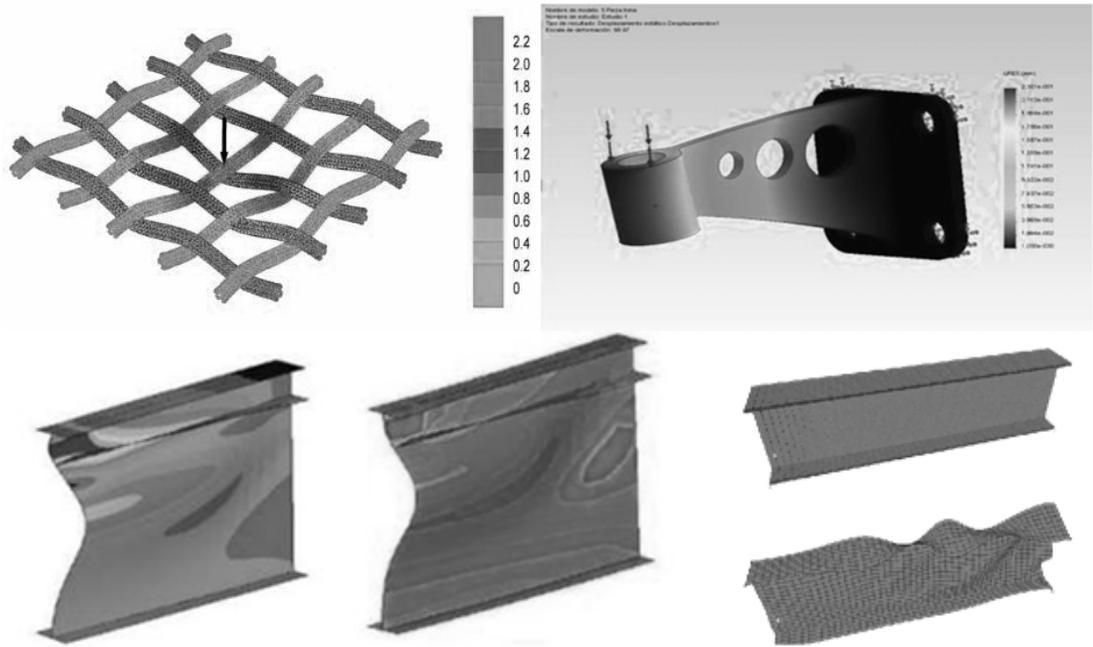


Fig. 5.11. Análisis de cargas en elementos estructurales como vigas o soportes metálicos.

- **Análisis de moldes – Colada y transmisiones de fluidos.**

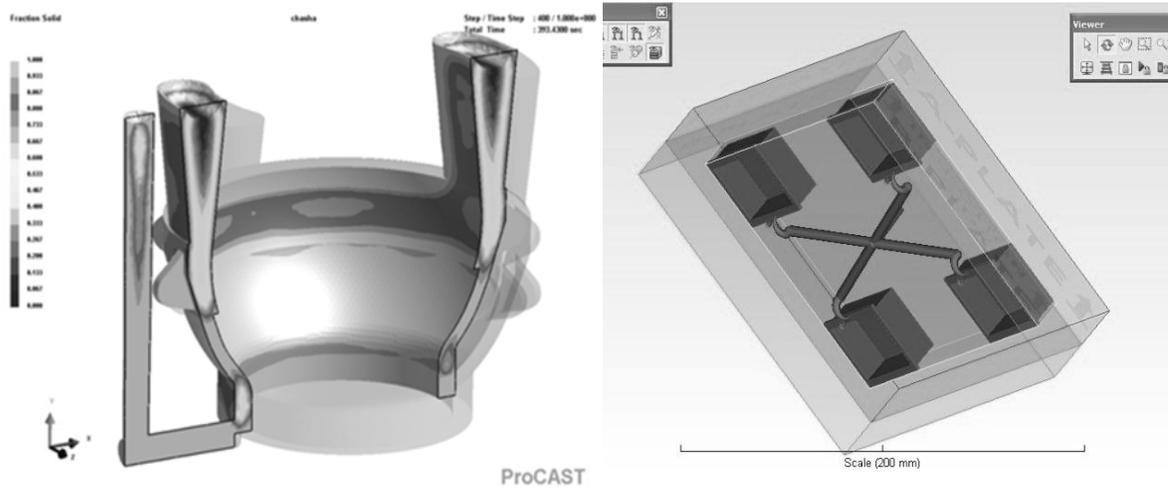


Fig.5.12. Simulación de colada en moldes.

- Análisis de frecuencias y vibraciones de estructuras.

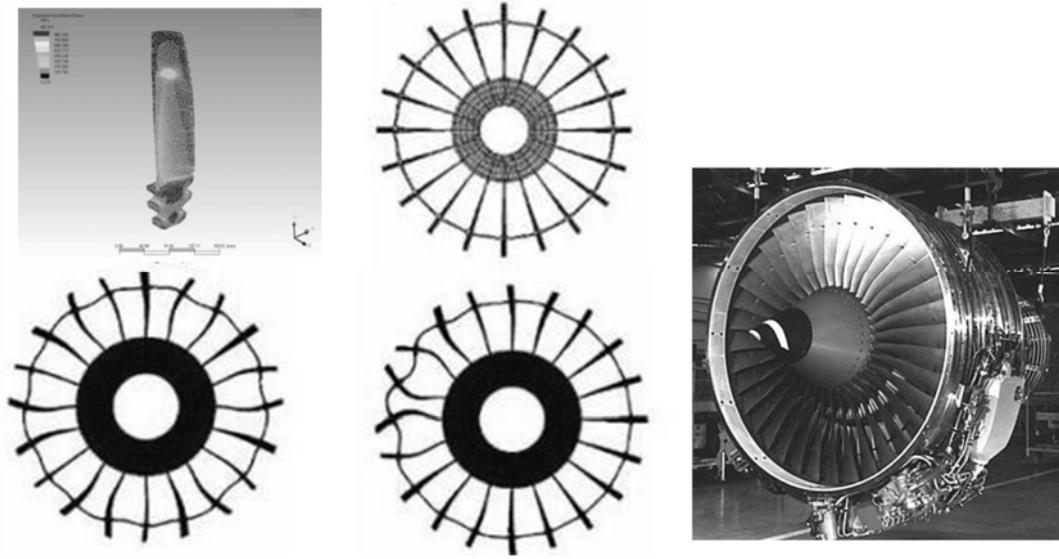


Fig.5.13. Estudio de modos propios de vibración, frecuencias de naturales y de trabajo.

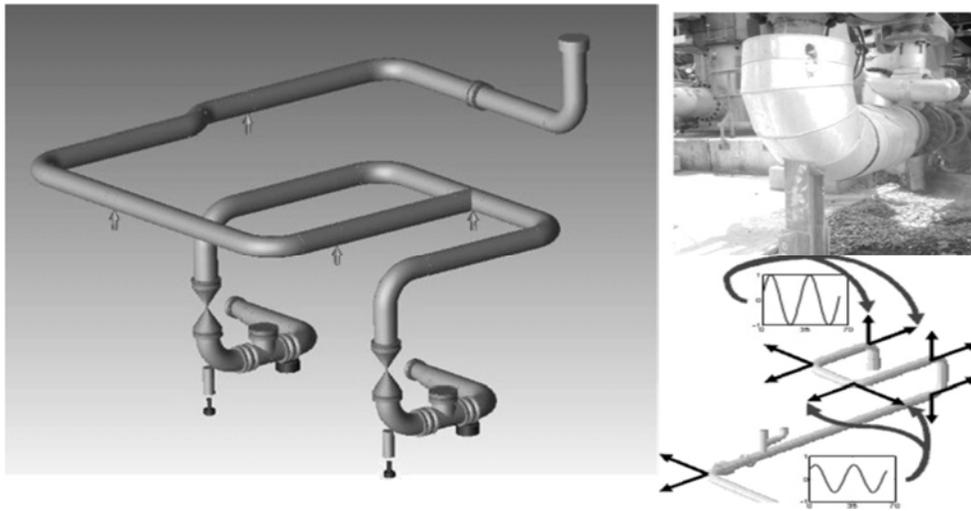


Fig.5.14. Cálculo de frecuencias, modos propios de vibración y de la respuesta forzada armónica en sistemas de tuberías bajo condiciones de flujo pulsante.

. Estudios y modelados óseos y prótesis.

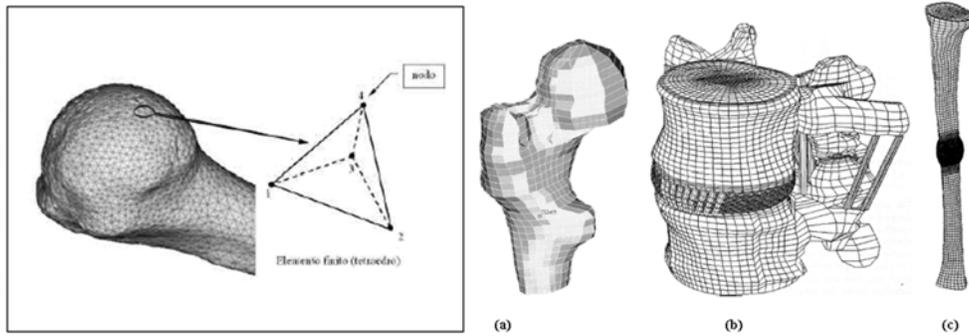


Fig.5.15. Modelado de huesos y articulaciones.

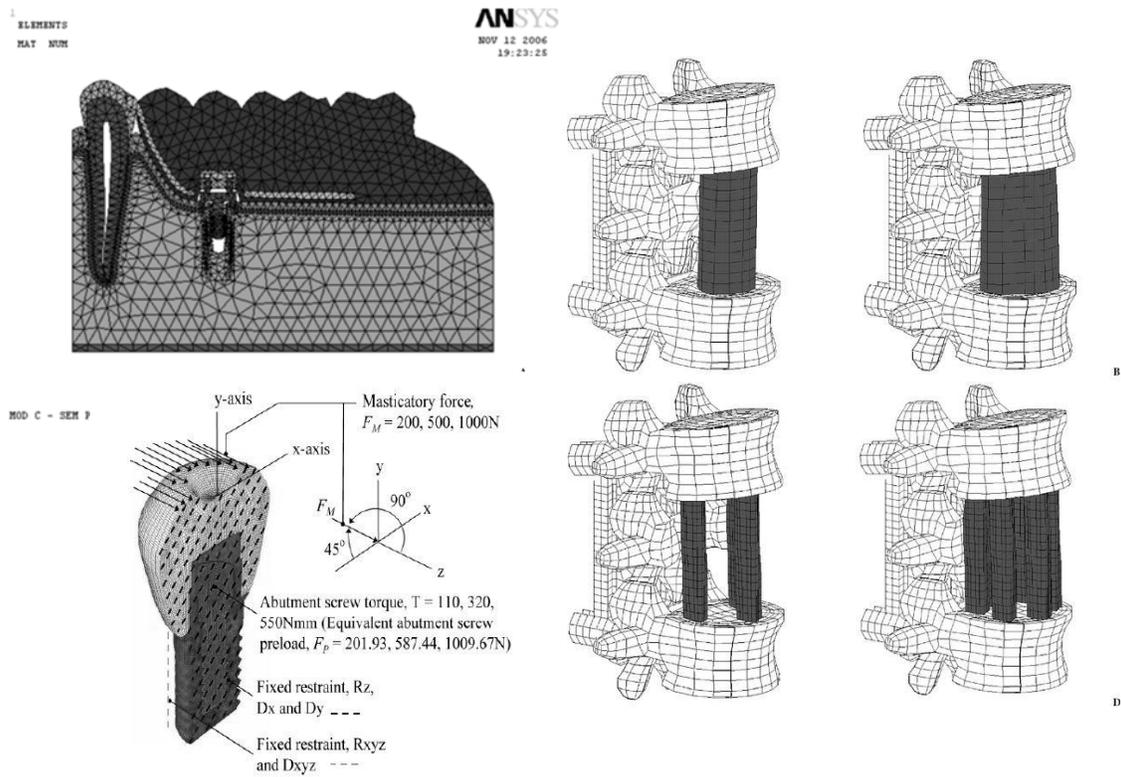
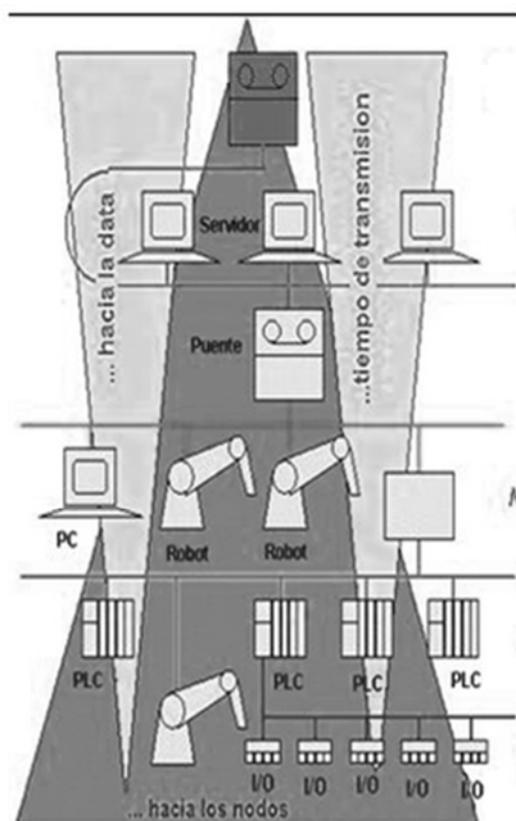


Fig.5.16. Desarrollo y simulación de prótesis.

CAPITULO VI

Sistemas CIM



6. SISTEMAS CIM

6.1 Concepto CIM

La sigla **CIM** significa **“Computer Integrated Manufacturing”** que al traducirlo al español es **“Manufactura Integrada por Computadora”**.

La aplicación de los sistemas computacionales para el diseño y la manufactura han tenido un amplio desarrollo y se han extendido a diversos sectores productivos. Se analizan sus beneficios desde la perspectiva de la mediana y la pequeña empresa las cuales se enfrentan con la necesidad de ser competitivas a nivel mundial y, en especial, presentar las aplicaciones de CAD/CAM que se lo permitan.

Otro aspecto a considerar en un mercado tan competitivo, abierto y de múltiples opciones, es el soporte tecnológico posventa del cual dispone el proveedor.

El modelo CIM es aplicable a todas las funciones operacionales y de proceso de información de la fábrica, desde la recepción de pedidos, el diseño, la producción y finalmente la expedición de productos. Para conseguir este objetivo los sistemas CIM se valen de computadores situados en las diversas áreas relacionadas con el proceso de producción: desde la planificación de la producción, el diseño y la fabricación del producto, hasta las pruebas para asegurar la calidad del mismo.

La flexibilidad se consigue mediante el acoplamiento y sincronización del flujo de datos e información con los medios automatizados de fabricación, transporte y almacenamiento, mediante redes locales LAN (Local Area Network) que permiten realizar la conexión entre los computadores de los diversos subsistemas.



Fig.6.1. Concepto CIM.

A pesar que CIM implica integrar todos los pasos de un proceso de manufactura, en la práctica muchas compañías han logrado grandes beneficios al implementar sistemas CIM parciales, es decir, en solo

Grupo Diseño, Gestión y Desarrollo de Nuevos Productos

algunas áreas de la empresa. De hecho se cree que aún no existe ninguna empresa que haya logrado una integración total del sistema. Sin embargo, se sabe con certeza que éste es el próximo paso a seguir.

6.2 Elementos de un sistema CIM

Un sistema CIM integra las denominadas Tecnologías Avanzadas de Fabricación (AMT) con las Tecnologías de la Información y Comunicaciones (TIC).

Tabla 6.1. Elementos de un sistema CIM.

FUNCIONES	ACCIONES ASISTIDAS POR COMPUTADOR
Desarrollo del Producto Planificar – Concebir – Diseñar	CAE (Ingeniería Asistida por Computadora)
Dibujar – Elaborar	CAD (Diseño Asistido por Computadora)
Preparación del trabajo – QUÉ, CÓMO, CON QUÉ va a ser producido	CAP (Planificación Asistida por Computadora)
Planificación de la Fabricación / Producción – Determinar CUÁNTO, CUÁNDO, DÓNDE, CON QUÉ se ha de producir	PPC (Control Programado de Producción)
Control de la Fabricación / Producción Órdenes de trabajo Control de órdenes de trabajo	DNC (Control Numérico Directo)
Control de la Fabricación / Producción Control del Proceso / Supervisión Aseguramiento de la calidad	DL (Registro de Datos)
Fabricación y ensamblado Sistemas de fabricación Máquinas / Grupo de máquinas	CAQ (Calidad Asistida por Computadora)
Sistemas de manipulación	Centros de Mecanizado
Sistemas de almacenamiento	Máquinas de CN / Robots
Sistemas de manutención Flujo de material	Almacenes Automatizados
	Sistema de Transporte Automatizado
	CAM (Manufactura Asistida por Computadora)
	FMS (Sistemas Flexibles de Fabricación)

CIM - Manufactura Integrada por Computadora

6.3 Objetivos del CIM

CASA/SME (Computer and Automated Systems Association – Society of Manufacturing Engineers) define un sistema CIM como aquel que alcanza los tres siguientes objetivos:

- El establecimiento de una red de información que abarque la totalidad de la planta de producción.
- El establecimiento de una arquitectura global de flujo de información y adquisición de datos.
- La simplificación de la función de producción.

De forma más gráfica, SME presentó su famosa rueda de la empresa CIM:

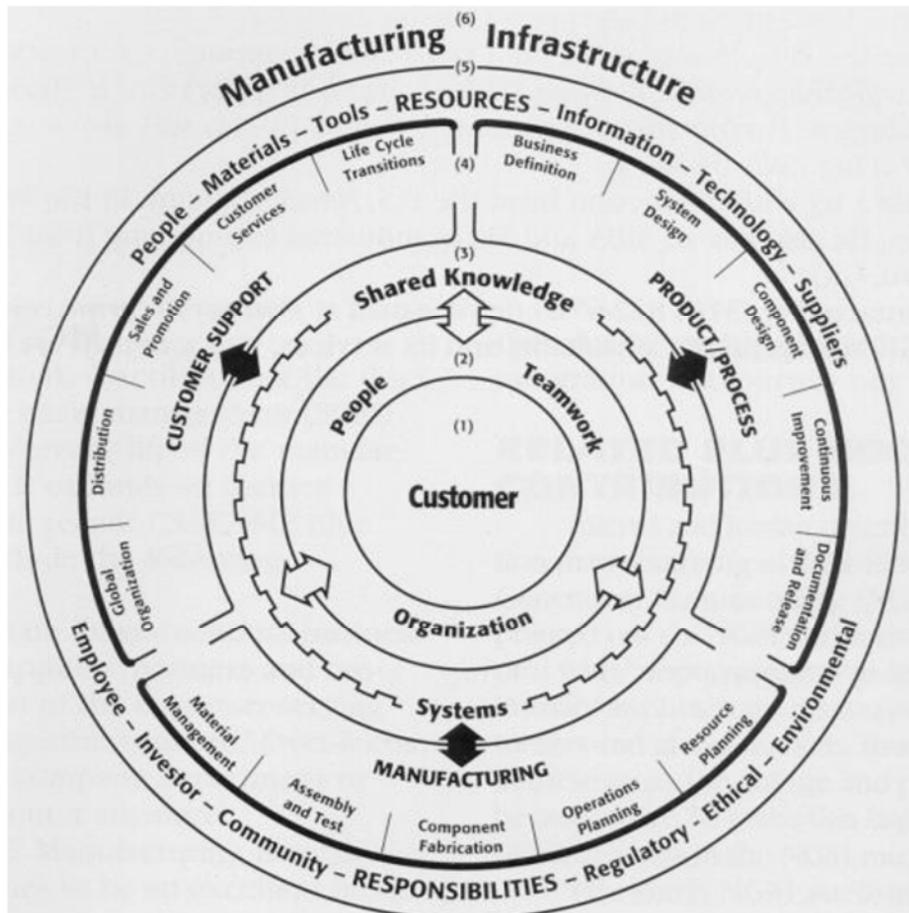


Fig.6.2. Rueda de la empresa CIM.

Algunos de los objetivos que se buscan con el sistema CIM son:

- Especificar el sistema de fabricación flexible a implantar en una industria.
- Ensamblaje de módulos con diferentes partes y piezas (electrónicos, mecánicos, etc.).
- Conocer y usar correctamente distintos componentes mecánicos.
- Ensamblar y desensamblar componentes mecánicos.
- Conocer, optimizar e instalar componentes neumáticos (Cilindros, Válvulas).
- Leer y desarrollar planos de circuitos neumáticos.
- Conocer el uso de compresoras y secadores.
- Conocer el uso de los distintos tipos de sensores (inductivos, capacitivos, ópticos, etc.).
- Conocer la estructura y modo de operación de un Control Lógico Programable.
- Conocer la interface entre un PLC y el controlador de un robot.
- Diseñar e implementar sistemas automatizados.
- Programar robots industriales.

Grupo Diseño, Gestión y Desarrollo de Nuevos Productos

- Conocer el uso de sistemas de ensamblaje automatizados y los diferentes tipos de grippers.
- Localizar y corregir fallas en un Sistema Automatizado.
- Optimizar sistemas automatizados.
- Conocer y operar máquinas herramientas CNC.
- Programar y simular usando programas NC.
- Diseñar piezas de trabajo usando software CAD.
- Generar programas CNC usando software CAM.
- Conocer el uso de los sistemas de transporte y su interacción con los sistemas de producción.
- Mantenimiento de unidades y/o sistemas de fabricación flexible.
- Balancear líneas de producción.
- Planeamiento y control de materiales.
- Administrar y controlar inventario.
- Toma de tiempos en una línea de producción.
- Diseñar diagramas de procesos para distintas líneas de producción.

6.4 Aspectos de manufactura y producción

Como ya dijimos, el CIM incluye todas las actividades desde la percepción de la necesidad de un producto, la concepción, el diseño y el desarrollo; también la producción, marketing y soporte del producto en uso. Toda acción envuelta en estas actividades usa datos, ya sean textuales, gráficos o numéricos. El computador hoy en día es la herramienta más importante en la manipulación de datos y por ello ofrece la real posibilidad de integrar las ahora fragmentadas operaciones de manufactura en un sistema operativo único.

Tabla 6.2. Aspectos relacionados con CIM.

¿Qué se debe analizar en un CIM?	
Aspectos	Contenido
Procesos	<ul style="list-style-type: none">• Procesos de la compañía• Jerarquía de procesos• Grupos funcionales• Secuencia de funciones
Información	<ul style="list-style-type: none">• Tipo de información• Relaciones• Flujo de información• Estructuración
Recursos	<ul style="list-style-type: none">• Recursos tecnológicos: capacidades e infraestructura

¿Qué se debe analizar en un CIM?	
Aspectos	Contenido
	<ul style="list-style-type: none"> • Recursos humanos: habilidades, experiencias y conocimientos
Organización	<ul style="list-style-type: none"> • Enfoque de producto o procesos • Estructura organizacional • Enfoque de control

En el sistema CIM existen cinco dimensiones fundamentales:

Nivel de controlador de planta. Es el más alto nivel de la jerarquía de control. Está representado por la/s computadora/s central/es de la planta que realiza las funciones corporativas como administración de recursos y planeación general de la planta.

Nivel de controlador de área. Está representado por las computadoras (minicomputadoras) de control de las operaciones de la producción. Es responsable de la coordinación y programación de las actividades de las celdas de manufactura, así como de la entrada y salida de material.

Conectada a las computadoras centrales se encuentra/n la/s computador/as de análisis y diseño de ingeniería donde se realizan tareas como diseño del producto, análisis y prueba.

Adicionalmente este nivel realiza funciones de planeación y diseño asistido por computadora (CAD) y planeación de requerimientos de materiales (MRP, por sus siglas en inglés).

Nivel de controlador de celda. La función de este nivel implica la programación de las órdenes de manufactura y coordinación de todas las actividades dentro de una celda integrada de manufactura. Es representado por las computadoras (minicomputadoras, PC's y/o estaciones de trabajo). En general realiza la secuencia y control de los controladores de equipo.

Nivel de controlador de procesos o nivel de controlador de estación de trabajo. Incluye los controladores de equipo los cuales permiten automatizar el funcionamiento de las máquinas. Entre estos se encuentran los controladores de robots, controles lógicos programables (PLC's), CNC's y microcomputadores que habilitan a las máquinas a comunicarse con los demás niveles jerárquicos (incluso en el mismo nivel).

Nivel de equipo. Es el más bajo nivel de la jerarquía. Está representado por los dispositivos que ejecutan los comandos de control del nivel próximo superior. Éstos son los actuadores, relevadores, manejadores, switches y válvulas que se encuentra directamente sobre el equipo de producción. De una manera más general se considera a la maquinaria y equipo de producción como representativos de este nivel.

La comunicación entre los sistemas es vital en un ambiente moderno de manufactura. Una jerarquía de computadores que se comunican entre ellos implica al menos una estandarización en los protocolos de comunicación. Es así como existen los protocolos MAP y TOP (Manufacturing Automation Protocol y Technical and Office Protocol) los cuales permiten fluidez en la integración de los departamentos. Los protocolos son reglas que gobiernan la interacción entre entidades comunicadas y deben proveer una serie de servicios:

Grupo Diseño, Gestión y Desarrollo de Nuevos Productos

- Permitir la transmisión de datos entre programas o procesos en la red interna
- Tener mecanismos de control entre hardware y software
- Aislar a los programadores del resto cuando éstos lo necesitan
- Ser modular de tal manera que elegir entre protocolos alternativos tenga el mínimo impacto
- Permitir comunicación con otras redes

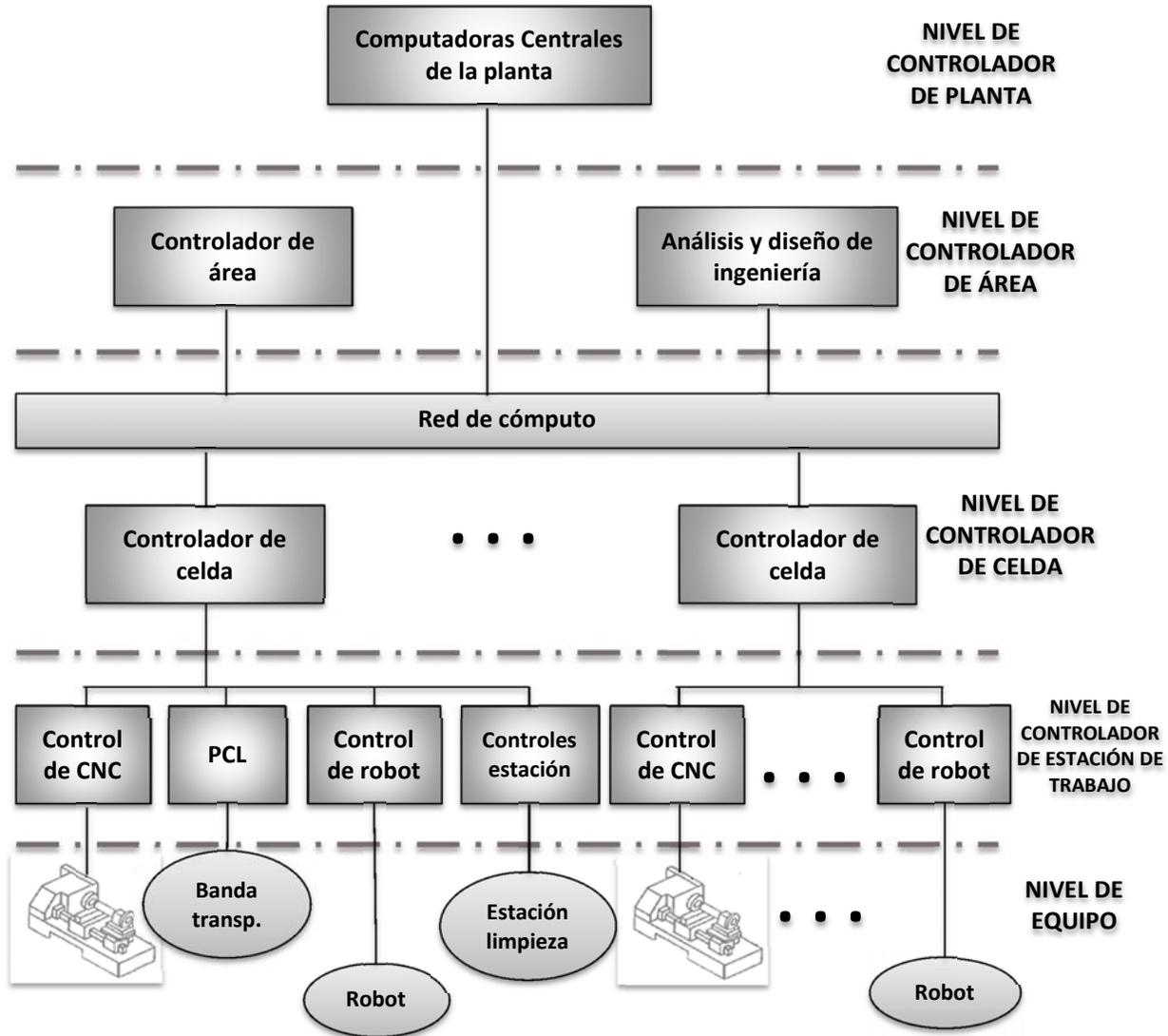


Fig.6.3. Estructura y niveles de los sistemas CIM.

6.5 Beneficios estratégicos del sistema CIM

La implementación de un sistema CIM debe verse por el valor de ella como una herramienta estratégica y no como una mera inversión de capital. Para aquellas compañías que eligen CIM los beneficios son reales y pueden significar la diferencia entre el éxito y el fracaso. Algunos de éstos son:

- **Flexibilidad:** capacidad de responder más rápidamente a cambios en los requerimientos de volumen o composición.
- **Calidad:** resultante de la inspección automática y mayor consistencia en la manufactura.

- **Tiempo perdido:** reducciones importantes resultantes de la eficiencia en la integración de información.
- **Inventarios:** reducción de inventario en proceso y de stock de piezas terminadas debido a la reducción de pérdidas de tiempo y el acceso oportuno a información precisa.
- **Control gerencial:** reducción de control como resultado de la accesibilidad a la información y la implementación de sistemas computacionales de decisión sobre factores de producción.
- **Espacio físico:** reducciones como resultado de incremento de la eficiencia en la distribución y la integración de operaciones.
- **Opciones:** previene riesgos de obsolescencia manteniendo la opción de explotar nueva tecnología.

CAPITULO VII

Sistemas CAAP



7. SISTEMA CAPP

7.1 Concepto de CAPP

La Planificación de Procesos, entendida como el acto de preparar instrucciones de operaciones detalladas para convertir un diseño de ingeniería en una pieza final, contiene una riqueza de datos de fabricación importante tales como la identificación de máquinas, herramientas, utillajes, selección de parámetros de mecanizado, operaciones y requerimientos del diseño. Esta situación ayudó en su momento al desarrollo de un sistema para resolver la tarea de la planificación de procesos surgiendo los sistemas conocidos como **CAPP** (*“Planificación de Procesos Asistida por Ordenador”, “Computer Aided Process Planning”* en inglés).

El sistema CAPP ha sido reconocido como una de las tareas más importantes en la investigación de la ingeniería de fabricación y se ha visto ayudada por la evolución de la informática y el hecho que el mercado haya alcanzado una masa crítica que le permite cuidar la inversión en I+D.

La tecnología CAPP ha sido dirigida por varios investigadores para ayudar a establecer un puente entre el CAD y el CAM a través de la mejora en la planificación de procesos. Los sistemas CAD proveen datos gráficos a los sistemas CAPP para usarse en la realización de dibujos de ensambles. Éstos se pueden introducir en la máquina herramienta por medio de soporte magnético o por instrucciones escritas.

Por lo tanto estos sistemas establecen una conexión imperativa entre las operaciones de diseño y de fabricación (combinadas con la MRP: planificación de recursos materiales), en el ambiente CIM, evolucionando desde la automatización, en sus inicios, hasta el carácter integrador de la filosofía CIM actualmente.

Para asegurar la correcta integración de las actividades de CAD/CAPP/CAM hay que contar entre sus elementos con una Base de Datos; la misma está dividida de manera ficticia en dos partes. Una de ellas almacena los datos pasivos que no se modificarán con frecuencia y se refiere a la información relacionada con entidades como máquinas, herramientas, materiales, operaciones, paso tecnológico, tolerancias, rugosidades y otras. La otra almacena los datos que tienen un movimiento mayor, o sea, están sujetos a modificaciones frecuentes. Esta parte contiene información relativa a las tecnologías generadas por el sistema CAPP.

7.2 Objetivos de la CAPP

La finalidad de la planificación de procesos es seleccionar y definir, en detalle, el proceso que debe ser ejecutado con el fin de transformar un material en bruto en una forma dada y de una manera efectiva. El objetivo primario es definir procesos factibles. El coste y la producción son objetivos secundarios y los recursos disponibles (máquinas -herramienta, herramientas de corte y trabajo) actúan como restricciones.

7.3 Factores importantes y método del sistema

La actividad de generación de tecnologías de maquinado llevada a cabo por los sistemas CAPP es compleja y en ella se involucran una serie de factores y conocimientos que influyen de forma positiva o negativa para que esta tarea se lleve a cabo correctamente. Dentro de éstos se pueden citar los siguientes:

- 1. El factor humano:** los conocimientos que tenga el tecnólogo sobre los procesos tecnológicos de maquinado tiene un peso considerable.
- 2. La pieza a obtener:** es muy importante conocer el destino de servicio y el material de la misma; las características técnicas de la pieza determinan la(s) máquina(s) y las herramientas con las que se fabrica.

Grupo Diseño, Gestión y Desarrollo de Nuevos Productos

3. La/s máquina/s herramientas: la rigidez y las características técnicas de la/s máquina/s disponibles deben garantizar obtener la pieza con las exigencias técnicas especificadas por el diseñador.

4. Las herramientas utilizadas: deben poseer las características físicas y la geometría necesaria para obtener la pieza final dependiendo del material y su forma.

5. Factor económico: la tecnología generada tiene que garantizar un consumo mínimo de energía, materiales, herramientas, tiempo y recursos que se traducen en un ahorro de dinero. Todo esto a tenor del factor ecológico.

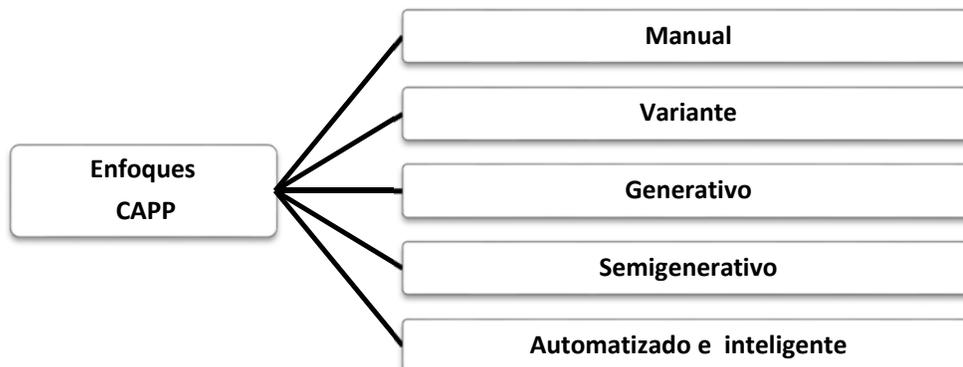
A partir de la entrada de información el sistema trabajara en pro de la consecución de los objetivos marcados anteriormente. Todo ello lleva a que los pasos necesarios para el desarrollo del trabajo y el cumplimiento de los objetivos sean:

- 1) Obtención de toda la información implícita y explícita de los productos a fabricar. Únicamente datos correspondientes al producto, obtenidos en la fase de diseño.
- 2) Obtención de toda la información relativa al proceso de fabricación, concretamente la relacionada con las herramientas y maquinas que permiten la realización del proceso.
- 3) Cálculo del proceso óptimo de fabricación. Cálculo de variantes para la realización del proceso.
- 4) Obtención de toda la información relativa a las coordinaciones entre las distintas máquinas.
- 5) Obtención de toda la información relativa a los sistemas de anclaje y fijación.
- 6) Cálculo de la secuenciación óptima de las operaciones.
- 7) Cálculo de las posibles variantes para la ejecución del mismo producto.
- 8) Determinación del estado actual de las tareas en planta de fabricación.
- 9) Combinación de los cálculos de proceso y de operaciones para la determinación del camino más adecuado.

En resumen, una vez escogida toda la información necesaria para planificar la producción, el funcionamiento del sistema CAPP se estructura a partir de la optimización del proceso de fabricación y determinar la secuenciación óptima de las operaciones a realizar.

7.4 Enfoques de los sistemas CAPP

Los sistemas CAPP han ido evolucionando temporalmente y tecnológicamente partiendo del enfoque tradicional/manual hacia los dos tradicionalmente reconocidos: el variante y el generativo. Aunque, con el desarrollo de nuevas técnicas, muchos sistemas CAPP no encajan exactamente en esta clasificación y combinan enfoques para dar lugar al semigenerativo y el automatizado.



Cuadro 7.1. Enfoques de los sistemas CAPP.

7.4.1 Enfoque manual

El enfoque de partida, el manual o tradicional implica examinar el dibujo de una pieza de ingeniería y desarrollar planes de procesos de fabricación e instrucciones basándose en el conocimiento de los procesos y las capacidades de la máquinas, de las herramientas, material, costes relacionados y prácticas del taller.

Este enfoque se apoya de manera importante sobre la experiencia del analista de fabricación para desarrollar los planes de procesos para que sean factibles, de bajo coste y consistentes con los planes de piezas similares. En algunos casos la tarea implica recordar e identificar planes similares y entonces crear una ruta para una pieza. La actividad es altamente subjetiva, intensa en trabajo, consume tiempo, es tediosa y requiere personal bien entrenado y con experiencia en las prácticas del taller de fabricación.

Consecuentemente, planes inconsistentes y requerimientos de tiempos largos para planificar son el resultado. Por otro lado los planes generados manualmente siempre reflejan las experiencias personales, preferencias y prejuicios del analista.

Las limitaciones y costes asociados con este enfoque provocaron que se pensara en utilizar la velocidad y la consistencia de los ordenadores para asistir en la determinación de planes de proceso.

7.4.2 Enfoque variante

Este enfoque es comparable con el manual donde un plan de proceso para una pieza nueva es creado para volver a llamar, identificar y reencontrar un plan existente para una similar, a veces llamada pieza máster, haciendo las modificaciones necesarias para la nueva.

En algunos sistemas variantes las piezas son agrupadas en un número de familias de piezas caracterizadas por las similitudes en métodos de fabricación y por lo tanto relacionadas con la tecnología de grupos. Para cada familia de piezas un plan de proceso estándar que incluye todas las operaciones posibles para la familia es guardado en el sistema por medio de la clasificación y codificación. Estos códigos a menudo son utilizados para identificar la familia de piezas y el plan estándar asociado.

7.4.3 Enfoque generativo

En este enfoque los planes son generados por medio de lógicas de decisión, fórmulas, algoritmos tecnológicos y datos basados en geometrías para representar las muchas decisiones de procesado para convertir una pieza desde el material bruto hasta el estado acabado. Las reglas de fabricación y las capacidades del equipo son guardadas en un ordenador, cuando éste se utiliza, un plan de procesos es generado sin la implicación de un planificador de proceso.

Para los sistemas generativos la entrada puede venir como entrada de texto o como entrada gráfica donde la pieza es deducida de un módulo CAD.

El enfoque generativo es complejo y difícil de desarrollar, incluso se llegó a plantear si era demasiado complejo para ser computarizado. No obstante el rápido desarrollo de las técnicas de inteligencia artificial y el éxito de su aplicación en otras áreas ha dado fuerzas para su aplicación en la planificación de procesos.

La mayor ventaja de este enfoque es que el proceso es consistente y completamente automatizado. Los sistemas generativos proporcionan resultados más precisos, consistentes y económicos.

7.4.4 Enfoque semigenerativo

Este enfoque está entre los dos anteriores en el ámbito de trabajo como en el temporal. Estos sistemas sirven para reducir la interacción de usuario por medio de features como secuencias de operación estándar, tablas de decisión, fórmulas matemáticas.

A primera vista los pasos del sistema de trabajo son los mismos que en el generativo pero el plan de procesos final debe ser examinado y deben corregirse los errores si no encaja con el ambiente de producción real. La modificación es pequeña en comparación con la de un sistema variante.

7.4.5 Enfoque automatizado e inteligente.

La evolución de los sistemas generativos ha generado actualmente el uso de determinadas técnicas que tienden a sustituir el término calificativo *generativo* por el de automatizado o inteligente.

En el caso de sistema automatizado las funciones de un sistema CAPP pueden ser organizadas de manera que se determinen un conjunto de planes de producción factibles basados en los requerimientos de procesado de un diseño de producto dado. Esta función implica tres tareas importantes:

- El reconocimiento automatizado de las propiedades de un producto desde su diseño de ingeniería.
- La determinación del conjunto de features para el cual la producción debe ser explícitamente planificada.
- El desarrollo de un conjunto de planes de producción factibles que será la entrada en una segunda etapa donde cada plan es organizado en un Programa de producción utilizando las características del taller.

La planificación de procesos presenta muchos cambios ya que implica una multitud de criterios contradictorios y objetivos competitivos con los cuales no es fácil ni modelizar ni codificar y requiere una gran operación de habilidad y conocimiento. Sin duda ésta es una de las tareas de investigación con un futuro de grandes expectativas.

7.5 Beneficios

La implementación del CAPP resulta en beneficios significativos. Entre los principales podemos nombrar:

- 1.** Reducción del tiempo principal en la planificación de procesos y rápida respuesta a los cambios ingenieriles.
- 2.** Mayor consistencia en la planificación del proceso y acceso de la información para actualizar una base de datos central.
- 3.** Mejoramiento en el procedimiento para estimar costos y menores errores de cálculos.
- 4.** La planificación de procesos es más completa y detallada.
- 5.** Mejoras en la planificación de la producción y su capacidad de aprovechamiento.
- 6.** Mayor habilidad para introducir nuevas tecnologías de manufactura y rápida actualización de la planificación de los procesos de las mismas.

CAPITULO VIII

Sistemas PDM



8. SISTEMAS PDM

8.1 Concepto de PDM

La sigla **PDM** significa "**Product Data Management**" que traducido significa "**Gestión de Datos del Producto**".

PDM consiste en el uso de software u otras herramientas para el seguimiento y control de datos relacionados con un producto en particular. Los datos de seguimiento por lo general involucran a las especificaciones técnicas del producto, la fabricación y el desarrollo y los tipos de materiales que se requieren para producir bienes. El uso de productos de gestión de datos permite a una empresa realizar un seguimiento de los costos asociados con la creación y lanzamiento de un producto.



Fig.8.1. Gestión de datos – PDM

Imaginemos que tiene en su computadora los datos del ensamblaje de un producto. A su vez, el diseñador que está sentado a su lado tiene en su equipo datos relacionados con él. Otro ingeniero situado a 800 km tiene todavía más datos. Sin un sistema probado de gestión de datos los problemas no tardarán en aparecer.



Fig.8.2. Problemas frecuentes en el manejo de datos.

El reto del PDM es maximizar los beneficios de tiempo de salida al mercado que produce la ingeniería concurrente mientras se mantiene el control de la información y la distribución automática de ella a las personas que la necesitan, cuando la necesitan. La manera en que el PDM enfrenta este reto es manteniendo los datos en un único lugar seguro llamado bóveda (vault) donde la integridad de la información puede ser garantizada y todos los cambios monitoreados controlados y guardados.

Por otro lado los duplicados de los datos maestros pueden ser distribuidos libremente a los usuarios de varios departamentos para su diseño, análisis y aprobación. La nueva información es entonces publicada (released) y regresada a la bóveda (vault). Cuando se hace un cambio a la información lo que ocurre realmente es que una copia con la información modificada, firmada y fechada se almacena en la bóveda al lado de la información vieja, la cual permanece en su forma original como un registro permanente.

Grupo Diseño, Gestión y Desarrollo de Nuevos Productos

Este es el principio básico detrás de los sistemas PDM. Para entenderlos más a fondo es necesario mirar separadamente cómo estos sistemas controlan la información del producto (Administración de la Información y Administración de los Procesos).

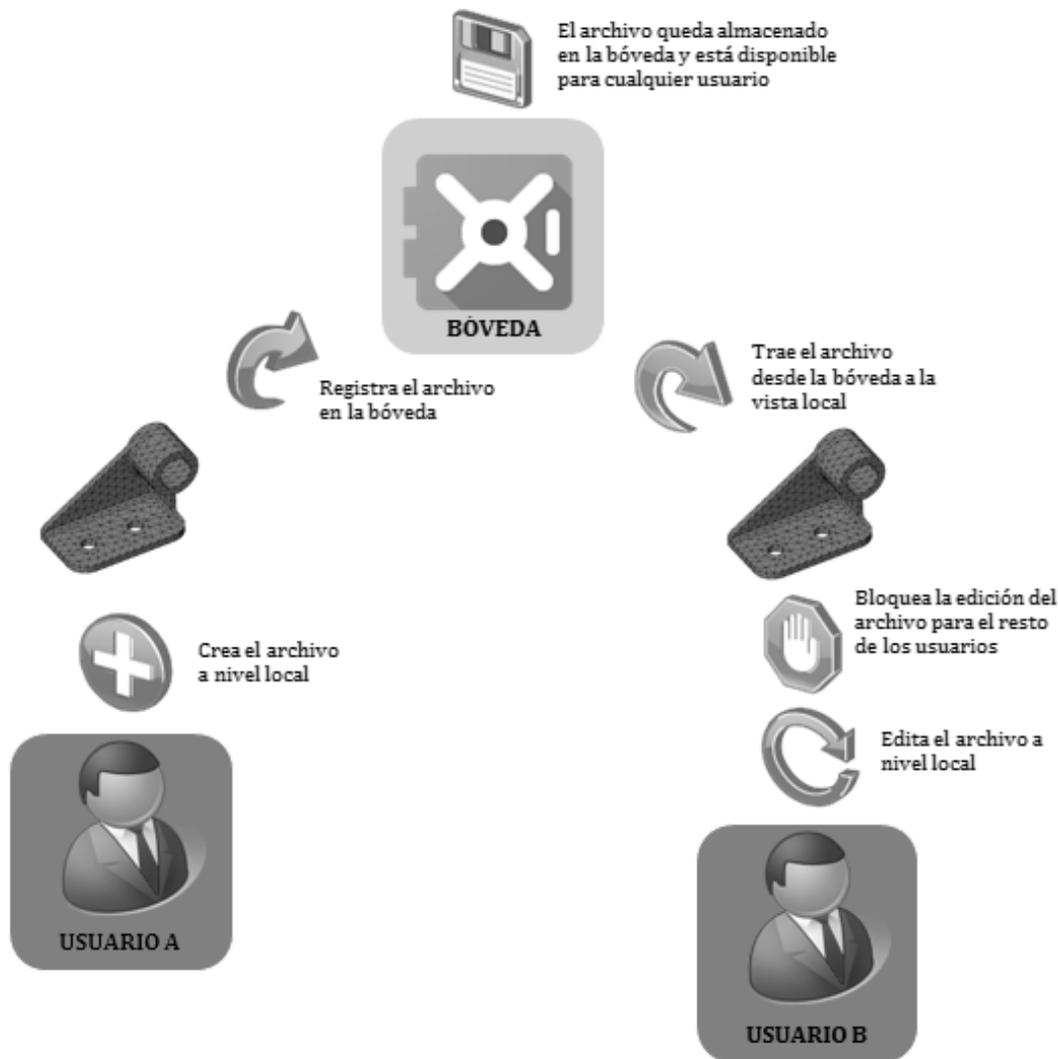


Fig.8.3. Administración de la información y procesos.

8.2 Administración de la Información

Las compañías fabricantes son usualmente buenas en el registro sistemático de sus planos de componentes y ensambles, pero frecuentemente no mantienen registros amplios de atributos como tamaño, peso, donde ha sido usado, etc. Como resultado los ingenieros a menudo tienen problemas accediendo a la información que necesitan. Esto provoca una desafortunada brecha en la capacidad de administrar efectivamente la información del producto. Los sistemas de administración de la información deben ser capaces de manejar ambos datos, los atributos y la documentación del producto, así como las relaciones entre ellos usando un sistema de base de datos relacional.

Con mucha información generada es necesario establecer una técnica de clasificación que sea fácil y rápida.

La misma debe ser una capacidad fundamental de un sistema PDM. La información de tipo similar debe ser capaz de ser agrupada en categorías. Una clasificación más detallada puede ser posible usando atributos para describir características esenciales acompañadas de cada componente en una categoría dada.

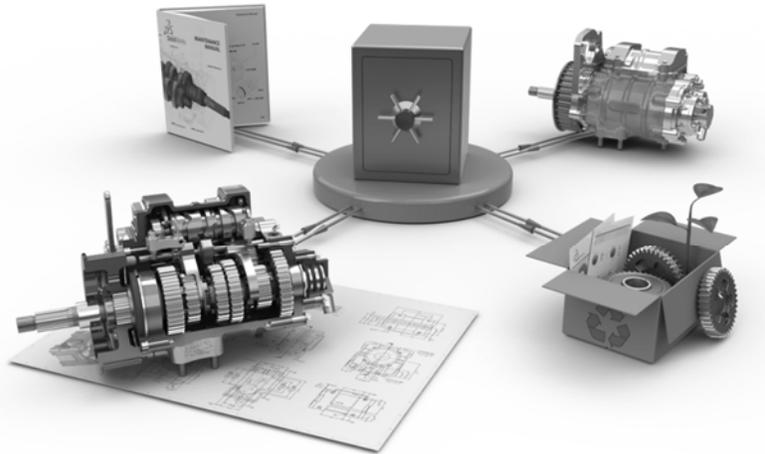


Fig.8.4. Componentes del PDM.

8.2.1 Clasificación de Componentes

Los componentes serán ingresados a la base de datos por medio de una variedad de categorías que satisfacen sus necesidades específicas. Éstas, en sí mismas, pueden ser agrupadas bajo amplios encabezados. Esto permite que todos los componentes con los que trabaja su empresa puedan ser organizados en una estructura jerárquica fácil de encontrar. A cada pieza le pueden ser dados sus propios atributos. Adicionalmente algunos sistemas permiten registrar que ciertos componentes estén disponibles con atributos opcionales específicos. Esto puede ser invaluable en el control de la Lista de Materiales (**Bill of Materials – BOMs**) debido a razones que serán tratadas más adelante.

8.2.2 Clasificación de Documentos

Part Number	Revision	Ver...	QTY	ERP UoM
SUB0679	P03	51	1	PC
SUB0781	P02	26	0	PC
SUB0647	P04	65	1	PC
SUB0655	P03	46	1	PC
PCA0078	P03	37	1	PC
PCA0070	P05	46	1	PC
HGS0548	P01	20	1	PC
FLD0765	P01	11	12	IN
FLD0164	PUR	12	1	PC
FAS0014	PUR	15	4	PC
FAS0237	PUR	18	7	PC
FAS0268	PUR	17	0	PC

Fig.8.5. BOMs – Lista de materiales.

Los documentos relacionados a los componentes y conjuntos pueden ser similarmente clasificados; por ejemplo las categorías podrían ser: planos, modelos 3D, publicaciones técnicas, archivos de hojas de cálculo, etc. Cada documento puede tener su propio conjunto de atributos: número de pieza, autor, fecha de ingreso. Y al mismo tiempo las relaciones entre documentos y los componentes en sí pueden ser

Grupo Diseño, Gestión y Desarrollo de Nuevos Productos

mantenidas. Por ejemplo un expediente de un “ensamble de rodamiento” podría ser extraído conteniendo planos 2D, modelos sólidos y archivos FEA.

8.2.3 Estructura del Producto

La tercera manera en que un producto puede ser accedido es por la estructura del producto. Para cualquier producto seleccionado las relaciones entre los ensambles y las piezas que componen dichos conjuntos deben ser mantenidas. Esto significa que se pueden abrir una Lista de Materiales, incluyendo

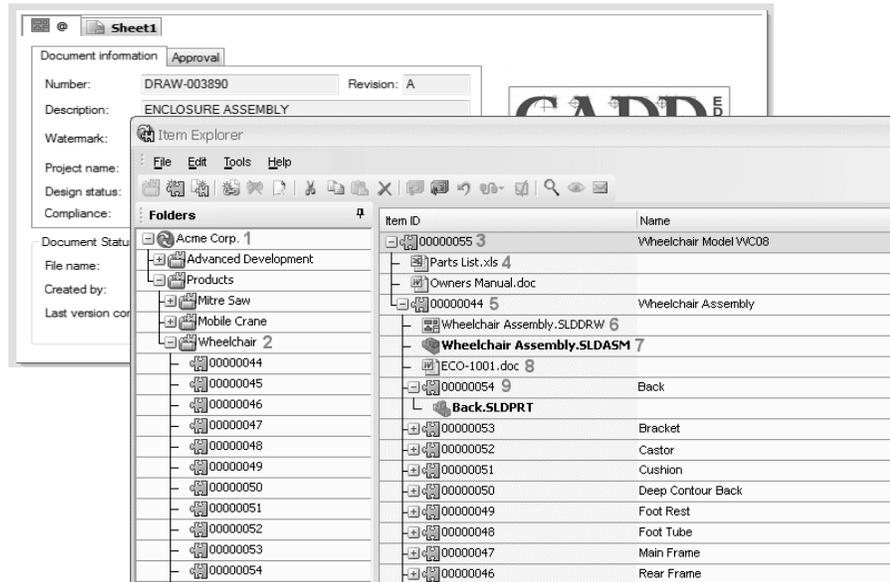


Fig.8.7. Estructura del producto.

documentos y piezas, así como también otro tipo de estructuras, por ejemplo documentos de manufactura, financieros, de mantenimiento o cualquier otro tipo de documentos relacionado.

8.2.4 Buscando la Información

Como podrá imaginar, usted debe ser capaz de llegar a los componentes e información del ensamble usando una variedad de rutas. Usted podría moverse arriba o abajo del árbol de clasificación, picar su camino a través de una estructura del producto; simplemente llamar a la información que usted quiere buscándola por su nombre, número de pieza o buscando en grupos de datos especificando un atributo o una combinación de atributos.

Por ejemplo usted podría buscar todos los remaches en acero inoxidable con cuerpo anodizado y que sean menores a 10mm.

8.3 Administración de Procesos

Hasta ahora se ha trabajado con la información organizada la cual es fácil de acceder, refinanciar o hacerle una referencia cruzada, básicamente procedimientos pasivos. La Administración de Procesos, por otro lado, se refiere a controlar la manera en que la gente crea y modifica la información, o sea procedimientos activos.

Esto puede sonar como un nuevo nombre para la administración de proyectos, pero no lo es sino que concierne en sí misma sólo a la delegación de tareas; la administración de procesos direcciona el impacto del trabajo de las tareas en la información.

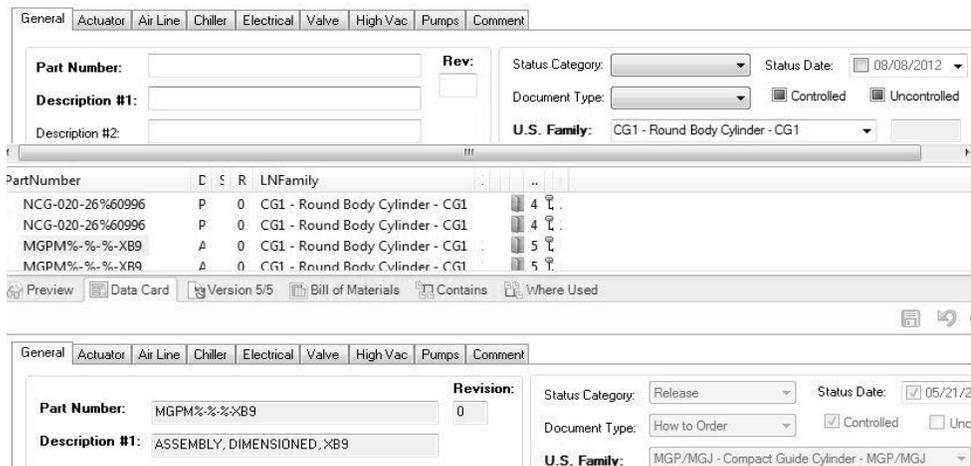


Fig.8.8. Búsqueda de Información.

Los sistemas de administración de procesos normalmente tienen tres amplias funciones:

- Administrar qué le pasa a la información cuando alguien trabaja en ella (Administración de Tareas – Work Management).
- Administrar el flujo de la información entre las personas (Administración del Flujo de Tareas – Workflow Management).
- Hacerle el seguimiento a todos los eventos y movimientos que ocurren en la funciones 1 y 2 durante la historias de un proyecto (Administración de la Historia de Tareas – Work History Management).

Los sistemas PDM pueden variar ampliamente en cómo realizan estas funciones. La siguiente es una visión general.

8.3.1 Administración de Tareas

A lo que se dedican los ingenieros es a crear y cambiar información. El acto de diseñar algo es exactamente eso. Un modelo sólido, por ejemplo, puede sufrir cientos de cambios durante el curso de su desarrollo, involucrando cada uno modificaciones importantes a la información de ingeniería. A menudo el ingeniero simplemente desea explorar un enfoque particular para luego abandonarlo a favor de una versión anterior.

Un sistema PDM ofrece una solución al actuar como el ambiente de trabajo del ingeniero, capturando meticulosamente toda la información nueva y modificada al momento que es generada, manteniendo un registro de qué versión es, trayéndola de nuevo por solicitud del usuario y manteniendo un seguimiento efectivo de cada movimiento del ingeniero.

Grupo Diseño, Gestión y Desarrollo de Nuevos Productos

Por supuesto cuando un ingeniero es requerido para llevar a cabo una modificación, él o ella normalmente requiere más que sólo el diseño original y la Orden de Cambio de Ingeniería (**Engineering Change Order – ECO**). Muchos documentos, archivos y formularios también necesitan ser referidos a otros miembros del equipo. En un ambiente tradicional de diseño se necesitaría recopilar una carpeta o expediente al cual el grupo se puede referir si lo necesita.

Los sistemas PDM actuales cumplen con estos requerimientos con diverso nivel de éxito. Una aproximación es la que emula los procesos basados en el papel usando lo que se conoce como paquetes de usuario (**user packets**).

Los paquetes permiten que el ingeniero maneje y modifique distintos tipos de documentos simultáneamente así como documentos adicionales de referencia. Este enfoque también cumple el principio de ingeniería concurrente. Por ejemplo, aunque sólo el usuario puede estar trabajando en el diseño maestro, los colegas que trabajen en el mismo proyecto pueden ser notificados inmediatamente que hay una nueva actualización al diseño maestro y las copias de referencia serán remitidas a ellos en sus propios paquetes. Uno de ellos, sólo puede seguir siendo trabajado por el usuario que ha iniciado la sesión, pero su contenido puede ser buscado y copiado por cualquier persona con los privilegios necesarios.

8.3.2 Administración del Flujo de Tareas

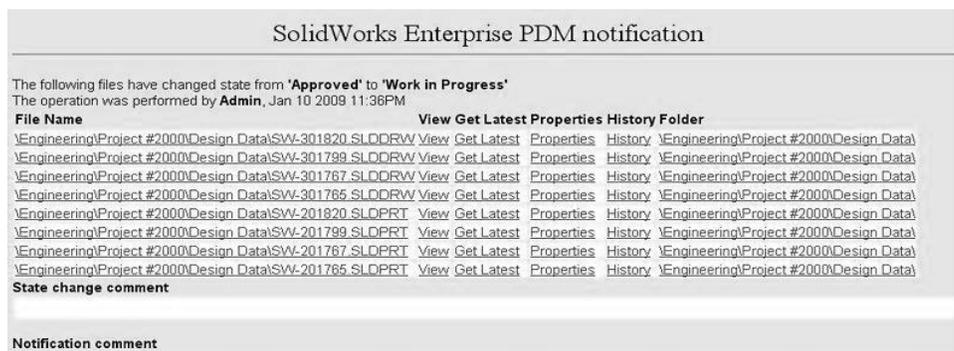


Fig.8.9. Administración de Tareas.

El uso de paquetes tiene la ventaja de hacer fácil para los miembros del equipo compartir grandes grupos de documentos, también son útiles por otra razón: hacen posible mover el trabajo de un departamento a otro o de individuo a individuo en agrupaciones lógicamente organizadas.

Durante el desarrollo de un producto puede ser necesario diseñar cientos de piezas. Para cada una de ellas es necesario crear, modificar, visualizar, comprobar y aprobar archivos por muchas personas diferentes, quizás más de una vez. Aún más, cada pieza puede necesitar diferentes técnicas de desarrollo y diferentes tipos de datos: modelación sólida para algunas, diagrama de circuitos o datos FEA para otros.

Y como si no fuera lo suficientemente confuso, trabajar en cada uno de estos archivos maestros tendrá un impacto potencial en las otras documentaciones relacionadas. De este modo se necesitará que haya un continuo chequeo, modificación y revisión. Con todos estos cambios superpuestos es muy fácil que un ingeniero esté invirtiendo una considerable cantidad de tiempo y esfuerzo tratando de seguir el rastro de un diseño que ha sido ya invalidado por el trabajo que alguien más hizo en otra etapa del proyecto. Traer el orden a este ampliamente complejo flujo de tareas es lo que los sistemas PDM mejor hacen. En particular mantienen el seguimiento de cientos de decisiones individuales que determinan quién hace la tarea que sigue.

La mayoría de los sistemas PDM le permiten al líder del proyecto controlar el proyecto a través de estados (**status**) usando detonadores (**trigger**) y listas de ruta (**routing list**) que pueden variar de acuerdo

al tipo de organización o desarrollo del proyecto en que se está envuelto. En lo que estos sistemas difieren es en cuánta flexibilidad permiten con la disciplina enmarcada. Los sistemas más rígidos están basados en procedimientos. Cada individuo o grupo de individuos está constituido para representar un estado en un proceso: En proceso, En Revisión, Revisado, Aprobado, Publicado (**Initiated, Submitted, Checked, Approved, Released**); un archivo o registro no puede ser movido desde un individuo o grupo al siguiente sin cambiar su estado. Algunos sistemas hacen esto posible al dar a la tarea la identidad de su dueño separándola de la gente que trabaja en ella.

Por ejemplo, suponga que un ingeniero que está trabajando en un diseño quiere consultar con sus colegas cuál es la mejor aproximación al diseño. Siempre que el modelo maestro y todos los archivos de referencia asociados estén contenidos y controlados por paquetes, entonces es simple hacer llegar el trabajo completo a cualquier número de personas sin provocar cambios de estado. El procedimiento formal del flujo de tareas no se compromete con esta redistribución porque la autorización para cambiar el estado de los archivos no se mueve con el paquete. La autorización continúa con el individuo designado.

La comunicación con el equipo de desarrollo también se mejora. Cuando los paquetes de datos y archivos son transmitidos pueden ser acompañados con instrucciones, notas y comentarios. Algunos sistemas tienen capacidades de límites de tiempo, otros incluso tienen la posibilidad para anotar informalmente archivos con el equivalente electrónico a notas post-it.

En otras palabras, un sistema de administración de procesos puede ser visto como una manera de relajar el ambiente de trabajo. El reto es ¿Qué tanto se puede permitir un equipo de trabajo informal y continuar manteniendo el control general de los costos del proyecto y términos?

La mayoría de los sistemas permite la actualización del estado de la tarea completa, con toda la información soportada, para ser seguida y visualizada por las personas autorizadas en todo momento.

Por supuesto, un paquete representa una tarea en el proyecto de desarrollo de un producto, el cual puede estar constituido por cientos de ellos. Cada paquete sigue su propia ruta a través del sistema pero la relación entre ellos también necesita ser controlada.

Para coordinar tan complejo flujo de labores efectivamente se necesita ser capaz de definir interdependencia de las tareas de manera que coincidan con la forma en que sus proyectos han sido estructurados. No todos los sistemas son fáciles de adaptar de esta manera. Algunos de los que existen tienen la capacidad de crear relaciones jerárquicas entre los archivos. Por ejemplo, usted le puede indicar al sistema que prevenga a un ingeniero de firmar un conjunto para ser editado hasta que sus componentes no hayan sido publicados individualmente.

8.3.3 Administración de la Historia de Tareas

Como hemos visto, los sistemas PDM no sólo pueden mantener una intensiva base de datos de registros del estado actual de un proyecto sino que también pueden grabar los estados del proyecto a medida que se pasa por ellos. Esto significa que son una potencial e invaluable fuente de información para una auditoría. La capacidad de realizar regularmente procesos de auditoría es un requerimiento fundamental para cumplir con las normas internacionales de administración como la ISO 9000, EN 29000 y BS5750. Pero la historia de la administración de proyecto también es importante ya que permite hacer un seguimiento hacia atrás de aquellos puntos específicos en el desarrollo del proyecto donde un problema pueda surgir o para los cuales se desea iniciar una nueva línea de desarrollo.

Grupo Diseño, Gestión y Desarrollo de Nuevos Productos

Es importante conocer cuáles son los eventos específicos que el sistema registra. Algunos sistemas sólo registran los cambios en los documentos propios. Así la propiedad puede ser seguida hasta un punto específico del tiempo pero no la modificación en sí misma. Otros tienen la capacidad de registrar cambios pero lo hacen en una serie de “fotos” tomadas solo cuando el archivo cambia de estado. Ésto puede provocar grandes aberturas en la historia del flujo de tareas; por ejemplo un usuario puede haber hecho modificaciones a un diseño por varias semanas sin haber hecho un cambio de estado. Algunos sistemas

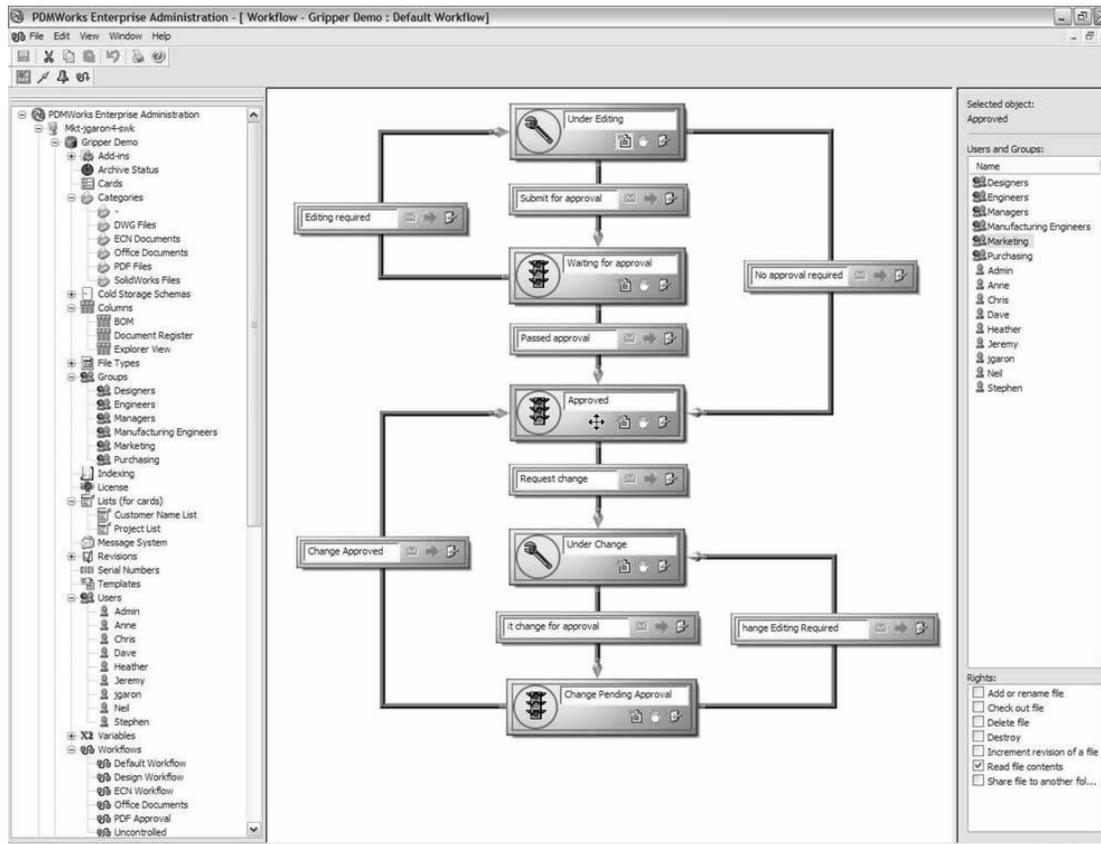


Fig.8.10. Administración del Flujo de Tareas.

ofrecen un registro histórico el cual es como una película que le permite registrar los cambios en cualquier nivel de un sistema predefinido que usted escoja, por ejemplo, cada vez que un archivo modificado es guardado.

Este nivel de seguimiento histórico, así como ofrece una auditoria intensiva, también permite el monitoreo activo del desempeño individual, el cual es invaluable durante los proyectos de tiempos crítico.

8.4 Beneficios del sistema PDM ⁴

8.4.1 La reducción del tiempo de salida al mercado.

Es el mayor beneficio de un sistema PDM. Tres factores sirven para definir los límites de la velocidad con que se puede lanzar un producto al mercado. Uno es el tiempo que se toma para realizar las tareas,

Event	Version	User	Date	Comment
Revision: B	9	Mary	2012-09-21 19:27:01	
Transition from 'Change Pending Approval' to 'Approved'	9	Mary	2012-09-21 19:27:01	OK per Plate ECO.xlsx
Checked in	9	Mary	2012-09-21 19:27:01	
Transition from 'Under Change' to 'Change Pending Approval'	8	John	2012-09-21 19:26:08	Corrected material
Labeled 'Copper Plate'	8	John	2012-09-21 19:25:41	Copper plate with hole
Checked in	8	John	2012-09-21 19:25:01	Copper
Transition from 'Change Pending Approval' to 'Under Change'	7	Mary	2012-09-21 19:23:31	Wrong material!
Transition from 'Under Change' to 'Change Pending Approval'	7	John	2012-09-21 19:02:00	Changed material
Checked in	7	John	2012-09-21 19:00:50	Changed material to rubber
Transition from 'Approved' to 'Under Change'	6	Mary	2012-09-21 18:58:02	Per Plate ECO.xlsx
Revision: A	6	Mary	2012-09-21 18:56:08	
Transition from 'Waiting for approval' to 'Approved'	6	Mary	2012-09-21 18:56:08	Meets design specification
Checked in	6	Mary	2012-09-21 18:56:08	
Transition from 'Under Editing' to 'Waiting for approval'	5	Steve	2012-09-21 18:55:08	Added material per specification
Checked in	5	Steve	2012-09-21 18:54:27	Brass
Transition from 'Waiting for approval' to 'Under Editing'	4	Mary	2012-09-21 18:52:54	Missed material specification 1.0 - sh...
Transition from 'Under Editing' to 'Waiting for approval'	4	Steve	2012-09-21 18:51:11	Added hole to plate

Fig.8.11. Historial de Tareas.

como un diseño de ingeniería. Otro es el tiempo perdido entre tareas, tal como cuando un diseño publicado se deja en la bandeja de trabajo de un ingeniero de producción en espera de ser procesado. Y el tercer tiempo es el perdido en el trabajo que hay que rehacer.

Un sistema PDM puede hacer mucho más para reducir estas limitaciones en el tiempo:

- Puede acelerar tareas haciendo la información instantáneamente disponible cuando se necesita.
- Soporta tareas de administración concurrente.
- Permite a miembros de equipos autorizados acceder a toda la información relevante, todo el tiempo, con la seguridad que ésta siempre será la última versión.

8.4.2 Productividad mejorada en el diseño

Los sistemas PDM, cuando manejan las herramientas adecuadas, pueden incrementar considerablemente la productividad de sus ingenieros.

Con un sistema PDM, alimentándolos con las herramientas correctas para acceder a esta información eficientemente, el proceso de diseño en sí mismo puede ser dramáticamente disminuido.

Otro factor es que los diseñadores pueden gastar más tiempo diseñando actualmente. Históricamente un ingeniero de diseño podía gastar cerca de un 25 a un 30% de su tiempo simplemente manejando información, buscándola, recuperándola, esperando por copias o planos, archivando la nueva información. El PDM remueve estos tiempos muertos casi completamente. El diseñador nunca más

⁴ Ver ANEXO E: "Ejemplos de implementación de PDM"

Grupo Diseño, Gestión y Desarrollo de Nuevos Productos

necesitará conocer dónde buscar diseños publicados u otra información ya que estará ahí completa cuando se requiera.

Un tercer e importante ahorrador de tiempo es la eliminación del síndrome de reinventar la rueda. La cantidad de tiempo que los diseñadores gastan resolviendo problemas que probablemente ya han sido resueltos antes es notoria. Frecuentemente se considera más rápido volverlo a hacer que localizar elementos ya diseñados que podrían ser rehusados. Con un sistema PDM, sin embargo, la identificación, re-uso y modificación de diseños similares puede volverse habitual.

8.4.3 Precisión mejorada en el diseño y la manufactura

Un importante beneficio de los sistemas PDM es que cada persona involucrada en el proyecto está operando en el mismo conjunto de información que está siempre actualizada. Si usted está trabajando en un archivo maestro sabe que es el único que lo hace; si está viendo una copia referenciada sabe que es una réplica de la última versión maestra. Así los diseños traslapados o inconsistentes son eliminados, aun cuando las personas estén operando concurrentemente. Naturalmente los pocos casos de problemas de diseño sólo emergen en la manufactura o control de calidad, produciendo ECOs y más diseños correctos al primer intento y una vez más un camino más rápido el mercado.

8.4.4 Mejor uso de las habilidades creativas del grupo

A menudo los diseñadores son conservadores en su aproximación a la solución de un problema debido a que el tiempo consumido para explorar soluciones alternativas es muy alto. Los riesgos de gastar un tiempo excesivo en una aproximación al diseño radicalmente nueva, la cual puede no funcionar, es inaceptable. Los sistemas PDM abren el proceso creativo de tres importantes maneras:

- Primero, mantiene un seguimiento de todos los documentos y resultados de pruebas relativos al cambio de un producto dado minimizando las tareas de re-trabajo y los posibles errores en el diseño.
- Segundo, reducen la posibilidad de fallas al compartir el riesgo con otros y al hacer la información disponible rápidamente a las personas adecuadas.
- Tercero, anima a la solución de problemas del equipo al permitir a los individuos compartir sus ideas con cada uno de los otros, usando la capacidad de transferencia de paquetes, sabiendo que todos los demás están mirando el mismo problema.

8.4.5 Uso comfortable

Aunque los sistemas PDM varían ampliamente en sus niveles de facilidad con el usuario, la mayoría operan con la estructura organizacional existente de una operación de ingeniería del producto sin mayor discontinuidad. Los sistemas, de hecho, pueden hacer tareas similares mucho más orientadas al usuario que antes. Cuando éste desea ver información en un sistema PDM la aplicación será cargada automáticamente cuando el documento sea cargado. En un ambiente de trabajo convencional los usuarios no tienen que ser expertos para acceder a la información o estar preparados para recibirla en una manera mucho menos flexible.

8.4.6 Integridad de la información garantizada

El concepto de una única bóveda central garantiza que la información es inmediatamente accesible a aquellos quienes la necesitan, como ser documentos maestros y registros históricos con los cambios absolutamente correctos y seguros.

8.4.7 Mejor control de los proyectos

La razón por la cual los proyectos de desarrollo de productos se retrasan no es porque sean mal planeados desde el principio sino porque regularmente se salen de control. La inmensa cantidad de información generada por el proyecto crece rápidamente más allá del alcance de las técnicas tradicionales de administración de proyectos, más importante que las presiones del tiempo de la competencia, más importante que la inconsistencia del alcance y la posibilidad de re-trabajo. Los sistemas PDM le permiten retener el control del proyecto asegurando que la información en la que está basada esté firmemente controlada.

La estructura del producto, la administración de los cambios, el control de la configuración y la trazabilidad son beneficios claves. El control puede ser incrementado por la publicación automática de la información y los procedimientos de transmisión electrónica. Como resultado, es imposible que una tarea programada sea ignorada, enterrada u olvidada.

8.4.8 Mejor manejo de los cambios de ingeniería

Un sistema PDM le debe permitir crear y mantener múltiples revisiones y versiones de cualquier diseño en la base de datos. Esto significa que las repeticiones pueden ser creadas sin la preocupación que versiones previas sean extraviadas o borradas accidentalmente. Cada versión y revisión debe ser firmada y fechada removiendo cualquier ambigüedad acerca de los diseños actuales y facilitando un seguimiento de revisión de cambios.

8.5 Un gran paso hacia la Administración Total de la Calidad

Con la introducción de un grupo de procedimientos coherentes en el ciclo de desarrollo de un producto un sistema PDM puede llegar de una manera muy amplia a establecer un ambiente para cumplir los requisitos de las normas ISO 9000 y de las Administración Total de la Calidad (TQM). Muchos de los principios fundamentales de la TQM, tales como el Fortalecimiento del Individuo para identificar y resolver los problemas, es inherente en la estructura de PDM. Los controles formales, las revisiones, los procesos de administración de cambios y la definición de responsabilidades pueden también garantizar que los sistemas PDM que seleccione contribuyan con el cumplimiento de las normas internacionales de calidad.

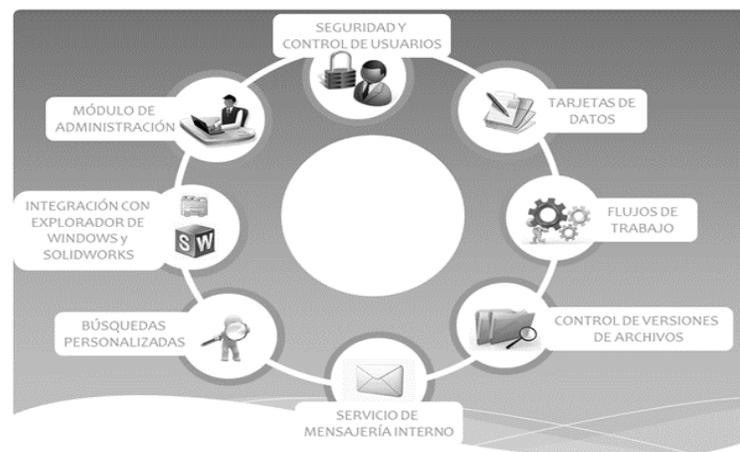


Fig.8.12. Administración total de la calidad.

CAPITULO IX

Sistemas PLM



9. SISTEMAS PLM

9.1 Concepto de PLM

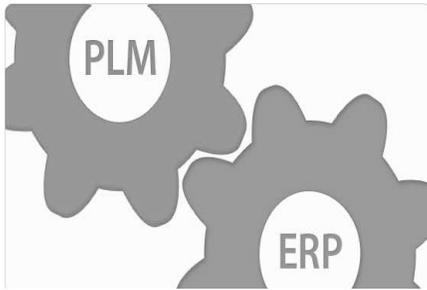


Fig.9.2. Integración PLM – ERP

El PLM (*“Product Lifecycle Management”* o *“Gestión del Ciclo de Vida del Producto”*) es una solución informática empresarial que permite implementar una estrategia de gestión de toda la información relacionada con el producto desde la primera idea hasta su retirada del mercado. Un sistema PLM gestiona entre otras cosas información, personas y procesos.

Integran las islas de información existentes en las empresas provocadas por unos procesos secuenciales, fragmentados, basados en papeles y archivos desperdigados con mucha intervención manual. Sin PLM los lanzamientos de nuevos productos son lentos, consumidores de recursos que son escasos, tienen poca visibilidad y son difíciles de gestionar y controlar.

Son útiles para cualquier empresa pequeña, mediana o grande, local o multinacional y de cualquier sector. Las primeras empresas en aplicar PLM, en la década de los 80, fueron las de productos discretos, en particular los fabricantes de automoción y aeronáutica. Actualmente son utilizados por empresas de todos los sectores industriales sin excepción: ha sido adoptada por los fabricantes de maquinaria y bienes de equipo, de sistemas de transporte, de todo tipo de equipos electrónicos y de bienes de consumo duraderos.

También se utiliza para la gestión de grandes proyectos y activos como las centrales de energía, petroquímicas, infraestructuras y construcción naval.

Por otra parte las empresas de proceso han entendido las ventajas estratégicas del PLM y esto ha llevado a que hoy en día se utilice en farmacias, química fina, perfumería, industria textil y de alimentos.



Fig.9.1. Ciclo PLM

9.2 Objetivos y funciones del PLM

Un sistema PLM sirve para:

- Centralizar y organizar todos los datos del producto.
- Gestionar formalmente los proyectos de diseño y desarrollo de productos.
- Integrar los procesos de diseño con los de industrialización y producción.

En virtud de esto un PLM permite tener bajo control y optimizar todos los procesos relacionados con el diseño y lanzamiento a producción de un nuevo producto así como los posteriores cambios durante toda su vida hasta su retiro del mercado. Contribuye a mejorar substancialmente la innovación de producto, los procesos de desarrollo y los de ingeniería y, como consecuencia, aumentar las ventas y reducir el coste.

Es importante entender que el PLM sirve para funciones muy diferentes del ERP (que desarrollaremos más adelante). Con el ERP se gestiona el capital físico (*“real”* → activos tangibles) de la

Grupo Diseño, Gestión y Desarrollo de Nuevos Productos

empresa, mientras que el PLM gestiona el capital intelectual (“virtual” → activos intangibles). Ambos son necesarios y complementarios. Por ejemplo, con el PLM gestionaremos las sucesivas versiones de las estructuras y listas de materiales de un producto en sus fases de desarrollo y sólo cuando éste sea liberado para producción la estructura será transmitida al ERP para hacer las compras y la planificación de la misma. El sistema PLM mantiene el histórico de la evolución del producto respondiendo a las preguntas de “quién, qué, cuando, porqué, cómo”, y el ERP acostumbra a tener sólo la visión en un cierto instante: “ahora y aquí”.

Las principales funciones de un sistema PLM son:

- **Almacenar, organizar y proteger los datos.** Agrupa todos los datos del producto en un servidor único. Los datos dejan de estar dispersos entre las carpetas de Windows y los organiza de una forma estandarizada.
- **Gestionar los documentos.** El PLM graba los documentos en la base de datos lo que permite buscar y recuperarlos, crear versiones o validarlos. Este puede ser, por ejemplo, un texto de ofimática, un modelo hecho con un sistema de CAD 3D, o el diseño de una placa electrónica.
- **Gestionar los cambios.** Permite establecer la trazabilidad de la historia de los documentos. Éstos pasarán por diferentes etapas en su ciclo de vida tales como: borrador, revisado, aprobado y obsoleto. Se guardan todas las versiones y su historial, así como los detalles de los cambios (quién, cuándo, porqué).
- **Buscar y recuperar la información.** Con el PLM los usuarios tienen a su disposición potentes mecanismos que permiten encontrar instantáneamente cualquier documento o conjunto de los mismos. Una vez localizado se puede conocer y recorrer ágilmente toda la estructura documental relacionada. Por ejemplo a partir de un plano encontrar la pieza y, a partir de la misma, los conjuntos a los cuales pertenece.
- **Compartir datos con usuarios de forma controlada.** Permite que varios usuarios puedan acceder a un mismo documento simultáneamente de manera que se evite el riesgo de sobrescribirlo.
- **Ejecutar procesos y flujos de trabajo (workflows).** Ayuda a ejecutar y controlar los diferentes procesos que los usuarios tienen que hacer con la información. Permiten definir fácilmente y de forma gráfica un flujo de trabajo indicando las tareas a realizar, las personas que tienen que participar y las reglas de negocio a cumplir.
- **Visualizar datos y documentos.** Se puede visualizar cualquier documento sin que el usuario tenga instalada la aplicación que se usó para crearlo. No se permite ningún tipo de manipulación pero habitualmente disponen de funciones de comentario y marcaje para poder opinar e informar sobre el contenido.
- **Crear, clasificar y gestionar artículos.** No basta con gestionar documentos, sino que éstos han de estar relacionados con los ítems o productos físicos a los que hacen referencia. Haciendo uso de esta prestación los usuarios crean los artículos y los vinculan con los documentos; estos vínculos se mantienen cuando el artículo se utiliza en un nuevo proyecto o estructura de manera que la estructura documental y la de producto estarán siempre en sincronía.
- **Crear estructuras y listas de materiales.** Una vez creados los artículos el PLM conforma la estructura del producto a diversos niveles. Después se pueden derivar múltiples vistas adicionales: la de producción, la de compras, la de mantenimiento. Habitualmente se dispone de funcionalidades para comparar dos estructuras entre sí o interrogar dónde se utiliza un

determinado artículo o grupo. Esto permite valorar el impacto de un cambio de ingeniería. También se pueden generar todo tipo de informes como las listas de materiales.

- **Integrar la información de ingeniería con otros sistemas y procesos informáticos empresariales.** Los sistemas PLM ofrecen funciones de exportación de la información generada para que sea utilizada por los otros sistemas de la empresa. La aplicación más relevante es la de transferir automáticamente los ítems, estructuras y listas de materiales al sistema de gestión a fin de hacerlas accesibles a los departamentos de compras y producción. Sin PLM éste es un proceso sin ningún de valor añadido que habitualmente se hace de forma manual, lo que puede causar graves errores en las fases productivas posteriores.

9.3 Características y funciones

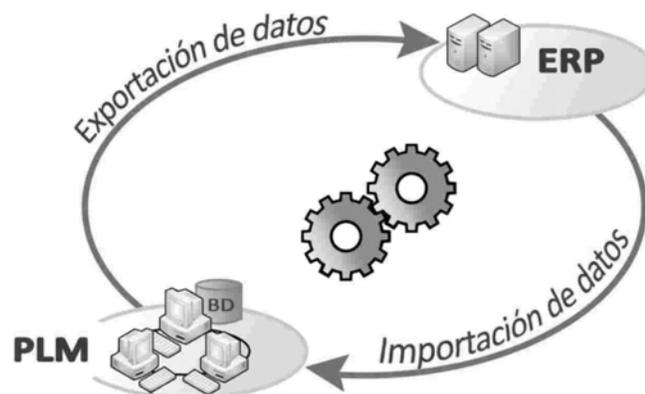


Fig.9.2 Relación PLM - ERP

9.3.1 Arquitectura de un sistema PLM

Los sistemas PLM tienen una arquitectura informática del tipo cliente-servidor aunque en las últimas generaciones se observa una creciente presencia de arquitecturas puramente web. Las partes que componen al sistema son:

- **El servidor.** En él opera una base de datos relacional en la que se almacena y gestiona toda la información.
- **Los clientes.** El acceso para los usuarios al servidor se hace mediante una aplicación cliente instalada en los ordenadores personales. Este acceso puede hacerse tanto vía red local como remotamente vía web. En el sistema PLM se guardan automáticamente todos los archivos generados por las numerosas aplicaciones informáticas y que de otra forma acostumbran a estar diseminados y desprotegidos por las carpetas y discos de los diversos ordenadores y servidores. De la misma manera cuando se quiere consultar, visualizar o recuperar cualquier información, ésta se busca en el sistema PLM.

Grupo Diseño, Gestión y Desarrollo de Nuevos Productos

- **El hardware.** Se requiere un servidor que dependerá del volumen de documentación a gestionar y del número de usuarios del sistema, pero nada especialmente diferente a otros sistemas de gestión empresarial.

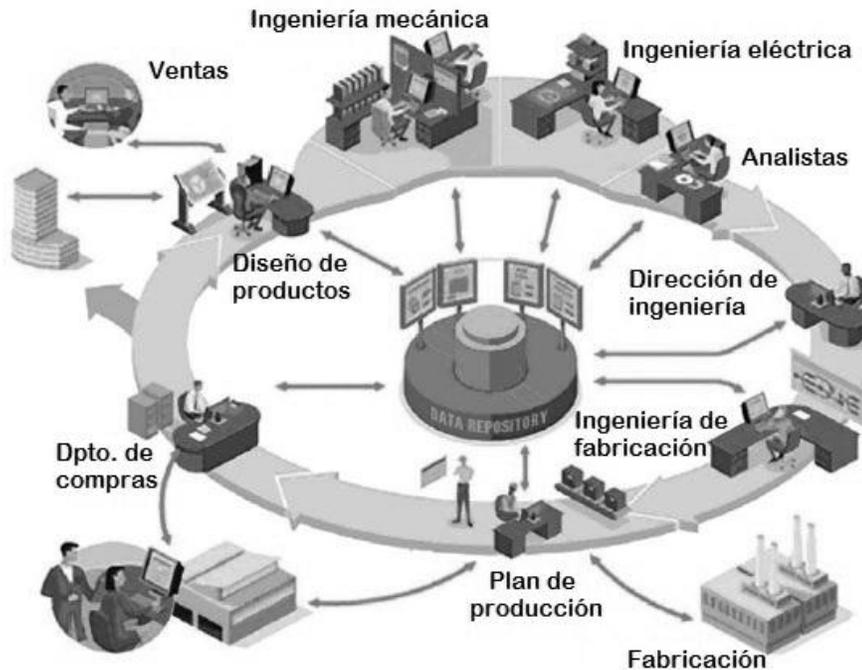


Fig.9.3. Estructura de un PLM.

9.3.2 Información gestionada

En la base de datos del servidor (llamada vault) se archivan objetos de información de todo tipo, sin limitación. Una característica fundamental es que cada objeto de información está guardado sólo una única vez en el sistema, lo que se conoce como "dato único". Cuando este objeto tiene que formar parte de una nueva estructura, grupo o proyecto se establece un vínculo entre su ubicación lógica original y el nuevo lugar en el que se utiliza de manera que nunca se duplica.

En general se gestiona la siguiente información:

- **Marketing y ventas:** cartera de productos, solicitudes de nuevos diseños, estudios, especificaciones, requerimientos, normativas, planificaciones de proyecto y presupuestos.
- **Diseño:** es la información creada para la definición del producto. Se gestionan, pues, modelos y conjuntos 3D, planos 2D, estudios de análisis, diseños de placas y circuitos electrónicos así como programas de automatismos y firmware. Del diseño se obtiene también la primera estructura de producto y las listas de materiales iniciales. Finalmente se dispone de catálogos de componentes de proveedores organizados en una estructura clasificada.
- **Ingeniería:** información relacionada con los productos físicos (materiales, productos y referencias) los cuales en el PLM se llaman ítems. Con un sistema PLM la estructura del producto y los ítems que lo componen son creados por los ingenieros en el propio sistema PLM, tarea para la cual ofrece funciones especializadas. También se gestionan las distintas configuraciones de la estructura del producto, opciones y variantes, así como los resultados de análisis, simulación y validación. Habitualmente se conectan los sistemas PLM con los ERP para acelerar el lanzamiento a producción.

- **Producción:** programas de control numérico, instrucciones de montaje y verificación. Activos, máquinas y medios de producción.
- **Otros servicios:** manuales de uso y mantenimiento de los productos.

9.3.3 Fases del PLM y tecnología correspondiente

Muchas de las soluciones de software se han desarrollado para organizar e integrar las diferentes fases del ciclo de vida de un producto. PLM no debe ser visto como un sólo producto de software sino una colección de herramientas de software y métodos de trabajo integrados juntos para afrontar las etapas individuales del ciclo de vida, conectar diferentes tareas o gestionar todo el proceso.

Algunos proveedores de software cubren toda la gama de aplicaciones PLM mientras otros se especifican en un nicho en particular. Algunas aplicaciones pueden abarcar muchos campos de PLM con módulos diferentes dentro del mismo modelo de datos.

A continuación describiremos una visión general de los campos de PLM. Cabe señalar, sin embargo, que las clasificaciones simples no siempre se ajustan exactamente; muchas áreas se superponen y muchos productos de software cubren más de una o no encajan fácilmente en una categoría. No hay que olvidar que uno de los objetivos principales de PLM es reunir el conocimiento que puede ser reutilizado para otros proyectos y coordinar el desarrollo simultáneo de muchos productos.

- **Fase 1: CONCEBIR → Imaginar, especificar, planificar, innovar**

La primera etapa de la idea es la definición de sus requisitos basados en cliente, la empresa, el mercado y puntos de vista de los organismos reguladores. A partir de esta especificación de los productos principales se pueden definir parámetros técnicos. Paralelamente a la especificación de los requisitos del diseño inicial se lleva a cabo la definición de la estética del producto junto con sus aspectos funcionales principales.

En algunos conceptos la inversión de recursos en la investigación o de análisis de las opciones pueden ser incluidos en la fase de concepción como por ejemplo llevar la tecnología a un nivel de madurez suficiente para pasar a la siguiente fase. Sin embargo el ciclo de vida de ingeniería es iterativo. Siempre es posible que algo no funcione bien en cualquier fase y eso es suficiente para realizar copias de seguridad en una fase anterior.

- **Fase 2: DISEÑO → Describir, definir, desarrollar, probar, analizar y validar**

Aquí es donde el diseño detallado y el desarrollo de la forma del producto comienzan, progresando a pruebas de prototipos, por medio del lanzamiento de un piloto completo del producto. También puede implicar el rediseño y la rampa para la mejora de los productos existentes así como la obsolescencia planificada. La principal herramienta utilizada para el diseño y desarrollo es software CAD. Esta etapa abarca muchas disciplinas de ingeniería tales como: mecánica, eléctrica, electrónica de software (integrado) y de dominio específico, como por ejemplo arquitectónico, automotriz aeroespacial, etc.

Las tareas de simulación, validación y optimización se llevan a cabo utilizando software CAE que puede venir integrado en el paquete de CAD o ser independiente. Soluciones de software CAQ (Calidad Asistida por Computadora) se utilizan para tareas tales como el análisis de la tolerancia dimensional.

- **FASE 3: DARSE CUENTA → Fabricar, hacer, construir, adquirir, producir, vender y entregar**

Una vez que el diseño de los componentes del producto se ha completado se define el método de fabricación. Esto incluye la creación de instrucciones de mecanizado CNC de piezas del producto así como el empleo de herramientas para la fabricación de las piezas tales como software CAM, integrado o

Grupo Diseño, Gestión y Desarrollo de Nuevos Productos

independiente. Esto también incluye herramientas de análisis para la simulación de procesos para operaciones como fundición, moldeo y conformación en prensa.

Una vez que el método de fabricación se ha identificado CPM entra en juego. Se trata de CAP / CAPP, herramientas para la realización de distribución de la fábrica, planta y las instalaciones de producción y simulación. Por ejemplo prensa-line de simulación, ergonomía e industrial, así como la gestión de herramientas de selección.

Una vez que los componentes se fabrican su forma geométrica y tamaño pueden ser cotejados con los datos CAD originales con el uso de equipos de inspección asistida por ordenador y software. Paralelamente a las tareas de ingeniería se llevará a cabo la configuración de ventas de productos y el trabajo de documentación de comercialización. Esto podría incluir la transferencia de los datos de ingeniería (geometría y datos de la parte de la lista) a un configurador de ventas basado en la web y otros sistemas de autoedición.

- **Fase 4: SERVICIO → Utilizar, operar, mantener, apoyar, sostener, retirar, reciclar y eliminar**

La fase final del ciclo de vida implica el manejo de la información de servicio. Se debe proporcionar a los clientes y técnicos de servicio las indicaciones de soporte para su reparación y mantenimiento así como la de gestión de residuos / reciclado. Esto implica el uso de herramientas tales como Mantenimiento, Reparación y Operaciones de Software de gestión (MRO).

Hay un final de la vida útil de cada producto. Ya se trate de eliminación o destrucción de los objetos materiales o información, esto debe tenerse en cuenta ya que puede no estar libre de ramificaciones.

9.4 Innovación a partir del PLM

Los sistemas PLM son la herramienta fundamental que permite a la empresa establecer y aplicar con éxito estrategias de innovación puesto que van dirigidos a la mejora radical de los procesos que forman del desarrollo de nuevos productos y su puesta en el mercado.

Por su naturaleza el PLM consolida y facilita el acceso al conocimiento. Toda la información de los productos y procesos queda almacenada en un sistema que está siempre a disposición de todas las personas. El PLM mejora muy notablemente:

- **La reutilización del conocimiento:** cuando una empresa se plantea diseñar un nuevo producto o una mejora sobre uno ya existente tiene inmediatamente accesible todo su conocimiento en forma de archivo histórico de diseños y lecciones aprendidas. Permite recuperar fácilmente proyectos anteriores y estudiar alternativas y evoluciones con mucha agilidad. También fomenta la reutilización de componentes y modelos ya probados ahorrando prototipos y pruebas.
- **La colaboración:** permite trabajar conjunta y armónicamente sobre un mismo proyecto a todas las personas involucradas, de todos los departamentos, tanto local como lejanos, y se pueden tomar decisiones más fundamentadas ya desde las primeras fases del diseño en las que se fijan las características del producto y quedan comprometidos los costes del proyecto.

Los resultados son:

- Productos más innovadores.
- Superior calidad.
- Cumplimiento de normativas.
- El "time to market" se acorta notablemente.

- Costes de desarrollo reducidos.
- Incremento de los ingresos.

9.5 Clasificación de los sistemas PLM

Hay una variedad de sistemas PLM en el mercado los cuales se pueden agrupar y distinguir por los siguientes criterios:

A. Sector de actividad de la empresa.

A.1 Productos discretos e industriales.

- Bienes duraderos: maquinarias, productos industriales, bienes de consumo, electromecánica y mecatrónica.
- Electrónica: alta tecnología y semiconductores, telecomunicaciones, equipos para medicina.
- Automoción y transporte, aeronáutica y defensa.
- Energía, petroquímica, gas y agua.
- Construcción naval.
- Infraestructuras e ingeniería civil.

A.2 Consumo y proceso: Farmacia y química fina. Bienes de consumo empaquetados, alimentación y bebidas.

A.3 Moda y vestir, calzado y distribución.

B. Tamaño de la empresa

B.1 Pequeña y mediana empresa. Divisiones y departamentos de grandes empresas.

B.2 Grandes empresas y corporaciones.

C. Foco en ingeniería

C.1 Excelente soporte a las necesidades de los ingenieros y participantes en los procesos de diseño y definición del producto previo al lanzamiento a producción. Muy buena integración con las herramientas de CAD y de creación de información. Soporte adecuado a los procesos posteriores.

C.2 Foco en los procesos posteriores al lanzamiento a producción y en la logística de la cadena de suministro con menor soporte a los procesos de ingeniería y de creación de información.

9.6 Evaluación e implementación de un sistema PLM

9.6.1 Evaluación del sistema

Encontrar y evaluar un sistema PLM que sirva a las necesidades de una empresa a corto y largo plazo puede ser una tarea larga y compleja si no se hace con una adecuada metodología. Hay que escoger correctamente el software y la empresa que lo implante. Hacerlo bien significa obtener un rápido retorno de la inversión y elevadas ganancias durante muchos años. Hacerlo mal significará incurrir en gastos no previstos, retrasos en la implementación, insatisfacción y rechazo de los usuarios.

La siguiente es una guía orientativa para evaluar un sistema PLM:

1. **Involucrar a expertos en PLM.** Si la empresa no tiene personal con experiencia en PLM es preciso buscar un colaborador o consultor que haya hecho muchas implantaciones. Esto ayudará a que se planteen las cuestiones adecuadas en el proceso de selección.

Algunos consultores también podrán presentarse durante la implementación y operación del sistema. Es aconsejable que el consultor tenga independencia de los vendedores de software sin estar condicionado por las funcionalidades de un determinado sistema.

2. **Aprovechar la experiencia de otras empresas.** Es importante informarse lo antes posible sobre PLM leyendo publicaciones, navegando por la web, participando en seminarios y visitando empresas que lo hayan seleccionado e implementado. Esto permitirá tomar decisiones bien fundamentadas.
3. **Asegurar el soporte de la dirección y un presupuesto adecuado.** El PLM impacta sobre toda la organización y requiere un esfuerzo interno. Para garantizar los recursos necesarios es necesario que la dirección dé su soporte ejecutivo y económico desde el principio y también que comunique abiertamente a todos la importancia de la iniciativa. Éste es un punto fundamental.
4. **Disponer a las mejores personas.** El trabajo de selección sólo tendrá éxito si juntamente con el consultor participan personas internas que conozcan bien todas las áreas y procesos donde el PLM se tendrá que aplicar. Cualquier olvido tendrá después consecuencias negativas y requerirá acciones correctivas.
5. **Analizar los procesos y definir los requerimientos.** No se obtendrá la máxima rentabilidad de la tecnología PLM si previamente no se optimizan los procesos relacionados. Hay que analizar todos los procesos actuales y redefinirlos en el caso de ser necesario. Esto ayudará a establecer una lista detallada de requerimientos que determinarán las especificaciones y funciones del sistema. Un PLM puede eliminar la mayoría de las ineficiencias actuales en los procesos.
6. **Planificar una estrategia PLM a largo plazo.** Las empresas no planifican los errores pero cometen errores si no planifican. Una estrategia PLM definirá los objetivos de la implementación y aplicación a largo plazo. También considerará qué áreas de la empresa la usarán y las necesidades a cubrir prioritariamente, así como qué se hará con el PLM respecto a lo que se hará con otras aplicaciones y cómo se deberá integrar con éstas. De esta manera se evitará un futuro escenario negativo y todo el proceso de despliegue se llevará a cabo de forma gradual y coherente.
7. **Analizar el valor aportado por el PLM antes de fijar el presupuesto.** Si no se determina el valor aportado por el PLM no se puede calcular anticipadamente el retorno de la inversión. Esto puede derivar en sorpresas desagradables cuando se haga un análisis a posteriori. No es bueno fijar un presupuesto y después buscar una justificación. Por ello conocer el valor esperado evitará perder tiempo y dinero analizando soluciones que no encajan con las expectativas.
8. **Informes.** Una causa de fracaso de los proyectos PLM es la insatisfacción de los usuarios. PLM significa cambio, y la gestión del cambio es importante en cualquier proyecto que tenga un impacto relevante en la organización. El cambio se gestiona mejor si se preparan las personas previamente, involucrándolas en el proceso lo antes posible, pidiéndoles cuáles son sus expectativas sobre el sistema y considerando sus opiniones. Eso facilitará la aceptación del sistema y el éxito del proyecto.

9.6.2 Implementación de un PLM⁵

La elección de la metodología de implantación de un sistema PLM es una decisión muy importante, tanto o más que la propia elección del sistema.

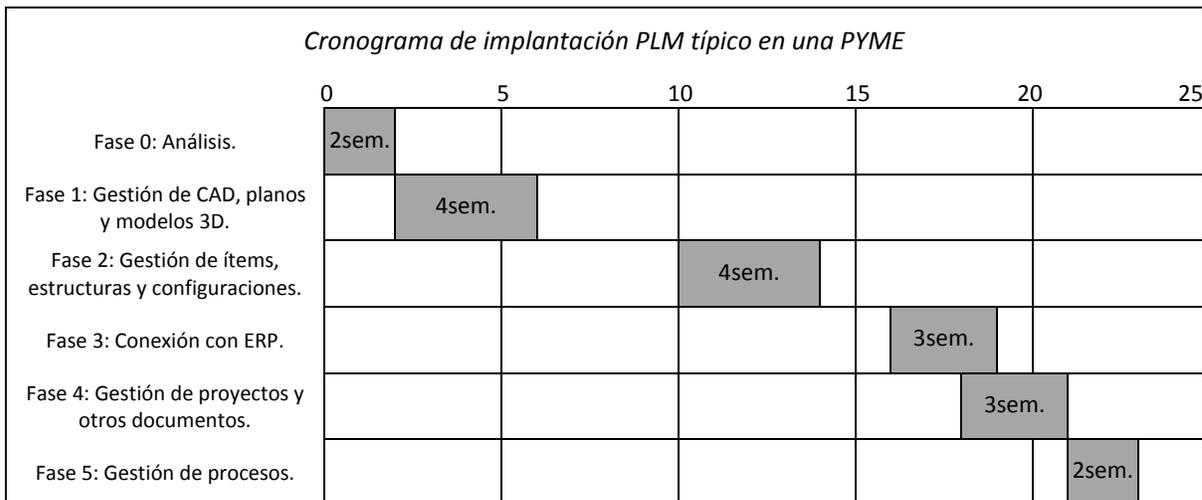
Preparación. La implantación de un sistema PLM requiere planificación y aplicar metodología de gestión de proyectos. No es esencialmente un proyecto informático, aunque ese aspecto es relevante. Es necesario determinar los objetivos a alcanzar, describir las cosas “como son ahora”, y definir “cómo tendrán que ser” una vez que el sistema esté en producción.

También se deberá escoger cuál es el mejor momento para hacer la implantación. Las épocas de baja actividad son muy adecuadas pues hay disponibilidad de recursos humanos.

El equipo del proyecto. Se preparará un equipo formado por personal interno y externo, este último del consultor de implementación. El equipo interno se formará con miembros de todos los departamentos involucrados en la futura explotación del sistema. Estas personas tendrán un buen conocimiento de los procesos y necesidades de la empresa. La elección del consultor externo es un aspecto crítico. Éste tendrá conocimientos contrastados de la tecnología PLM y de los procesos industriales y deberá acreditar experiencia en implantaciones similares.

Implementación por fases. Un proyecto PLM puede llegar a ser de gran alcance, según el tamaño de la empresa y las áreas de aplicación. Es muy recomendable una implementación gradual por fases, las cuales se definirán en función de los objetivos a alcanzar. Es necesario hacer una aproximación pragmática: pensar a largo plazo pero ejecutar en pequeñas fases bien controladas. Una implementación de este tipo minimiza los riesgos y facilita la aceptación de los usuarios. Los beneficios obtenidos en alcanzar una fase serán el impulso para desplegar la siguiente.

Tabla 9.1. Ejemplo de cronograma y planificación para la implantación de un PLM.



9.7 Beneficios que presenta el PLM

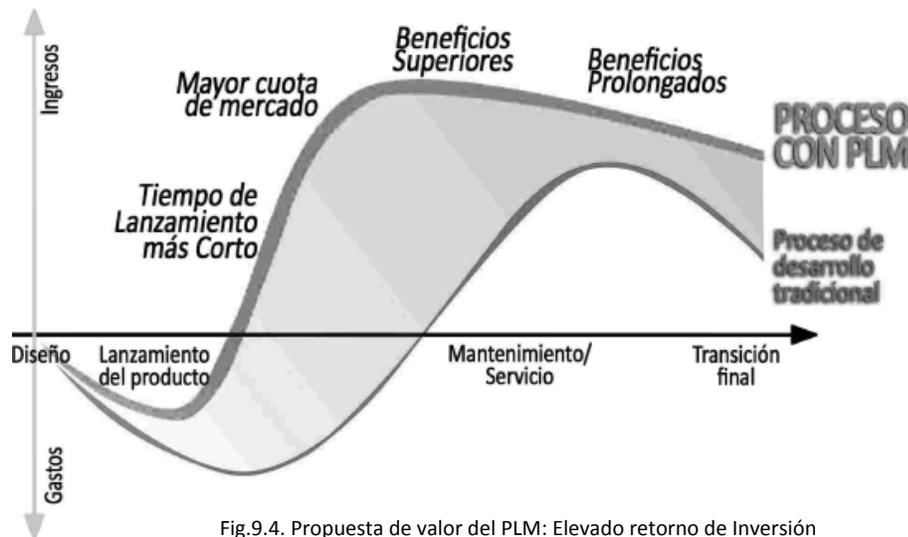
Los beneficios del PLM para una empresa con producto propio son de un alto valor estratégico. Se relacionan los más importantes, agrupados por áreas:

⁵ Ver ANEXO F: “Ejemplos de implementación de PLM”

Beneficios en la ejecución del negocio

- Aumenta las oportunidades de negocio y disminuye los costes gracias a un mejor acceso a datos coherentes.
- Fomenta la innovación, la predictibilidad, la flexibilidad y una mejor gestión. Mejora la calidad.
- Aumenta la velocidad del negocio y la respuesta a los cambios del mercado: lanzamientos de producto y lanzamientos a producción.
- Ayuda a cumplir las normas industriales y las regulaciones gubernamentales.
- Mantiene la trazabilidad de las acciones.

El PLM ayuda a explorar alternativas de diseño e ingeniería al principio de la vida de un producto. En las etapas iniciales hacer un cambio tiene un coste muy bajo, pero impacta decisivamente sobre los gastos futuros. Hacer cambios una vez está lanzado el producto supone costes muy elevados para la empresa y los clientes.



Beneficios para la organización:

- Elimina las barreras geográficas y facilita la internacionalización.
- Ayuda a hacer cambios en la organización.
- Facilita la subcontratación y la participación de proveedores en los procesos.
- Fomenta que los proyectistas reutilicen componentes, diseños y procesos y consolida el conocimiento de toda la organización tanto de datos como de procesos.
- Disminuye el riesgo de perder conocimiento cuando se marcha personal y facilita la rápida incorporación de nuevo personal.
- Trabajo organizado.
- Aumenta la seguridad en el acceso y protección de los datos.

Beneficios para los usuarios

- Ofrece una interfaz de acceso común a todos los datos.
- Cohesiona personas, datos y procesos.

- Proporciona mayores recursos a los trabajadores.
- Reduce la ejecución de tareas administrativas.

Beneficios para el producto o servicio

- Reduce los cementerios de piezas y recambios obsoletos.
- Permite aumentar la complejidad del producto de forma controlada.
- Facilita la extensión de la cartera de productos.
- Mejora la respuesta a las solicitudes de los clientes.
- Facilita las mejoras del producto en las primeras etapas del diseño.
- Disminuye los errores en las configuraciones y listas de materiales.
- Acorta los plazos de entrega.
- Gestiona todos los datos del producto durante todo su ciclo de vida.

10. SISTEMA MRP

10.1 Sistema MRP I

10.1.1 Concepto MRP I

Las técnicas **MRP I** o simplemente **MRP** (“*Materials Requirement Planning*” o “*Planificación de Necesidades de Materiales*”) son una solución relativamente nueva a un problema clásico en producción: el de controlar y coordinar los materiales para que estén en el lugar preciso, cuando se necesitan, sin la necesidad de tener un inventario excesivo.

Éste es un sistema de planificación de la producción y de gestión de stocks que responde a las preguntas: **¿Qué?, ¿Cuánto? y ¿Cuándo?**

El MRP está basado en dos ideas esenciales:

- **La demanda independiente.** La demanda de la mayoría de los artículos no es independiente. Únicamente los productos finales o terminados la poseen.
- **La estructura del producto.** Las necesidades de cada artículo y cuándo deben ser satisfechas se pueden calcular a partir de unos datos bastantes sencillos.

10.1.2 Objetivos

El objetivo del MRP es dar un enfoque más efectivo, sensible y disciplinado para determinar los requerimientos de material de cada empresa. Es un sistema que intenta dar a conocer simultáneamente tres puntos:

- **Asegurar materiales y productos** que estén disponibles para la producción y entrega a los clientes.
- **Mantener los niveles de inventario adecuados** para la operación. Emitir órdenes concretas de compra y fabricación para cada uno de los productos que intervienen en el proceso productivo.
- **Planear las actividades de** manufactura, horarios de entrega y actividades de compra.

10.1.3 Procedimiento



Fig.10.1. Interacciones de los sistemas MRP.

Enumerando las características principales del sistema MRP se pueden contar:

- Está orientado a los productos ya que, a partir de las necesidades de éstos, se planifica qué componentes son necesarios.
- Es prospectivo, porque se basa en las necesidades que se tendrán en el futuro.
- Realiza un desfase en el tiempo de las necesidades de cada ítem en función de los tiempos de suministros, estableciendo las fechas de emisión de órdenes y de entrega de pedidos.
- No se tienen en cuenta las restricciones de capacidad, por lo que no es un indicador de si un plan de fabricación es viable o no.
- Es una base de datos que debe ser empleada por las diferentes áreas de una compañía.

El sistema MRP compila información de al menos tres fuentes de información:

1. **El Plan Maestro de Producción.**
2. **El Estado del Inventario.**
3. **La lista de Materiales.**

A partir de estos datos se obtiene la siguiente información:

- El **plan de producción** de cada uno de los ítems que han de ser fabricados especificando cantidades y fechas en que han de ser lanzadas las órdenes de fabricación. Para calcular las cargas de trabajo de cada una de las secciones de la planta y, posteriormente, establecer el programa detallado de fabricación.
- El **plan de aprovisionamiento** detallando las fechas y tamaños de los pedidos a proveedores para todas aquellas referencias que son adquiridas en el exterior.
- El **informe de excepciones** que permite conocer qué órdenes de fabricación van retrasadas y cuáles son sus posibles repercusiones sobre el plan de producción y, en última instancia, sobre las fechas de entrega de los pedidos a los clientes. Se comprende la importancia de esta información con vistas a renegociar éstas si es posible o, alternativamente, el lanzamiento de órdenes de fabricación urgentes, adquisición en el exterior, contratación de horas extraordinarias u otras medidas que el supervisor o responsable de producción considere oportunas.

Resumiendo:

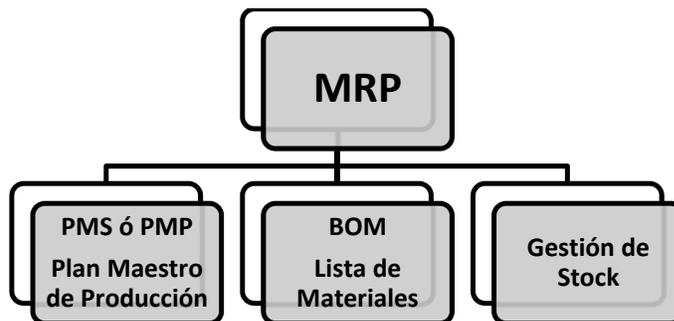


Fig.10.2. Elementos de un sistema MRP.

10.1.4 Plan maestro detallado de producción (PMS)

Nos dice, con base en los pedidos de los clientes y los pronósticos de demanda, qué productos finales hay que fabricar y en qué plazos deben tenerse terminados. Contiene las cantidades y fechas en que han de estar disponibles los productos de la planta que están sometidos a demanda externa (productos finales

fundamentalmente y, posiblemente, piezas de repuesto). Una vez fijado éste, el cometido del resto del sistema es su cumplimiento y ejecución con el máximo de eficiencia.

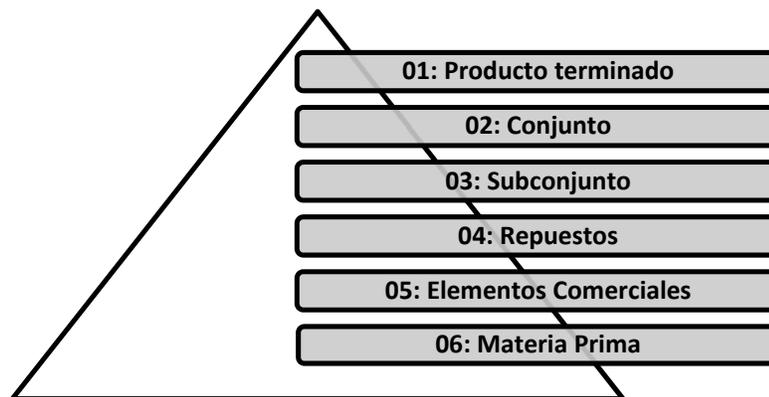
10.1.5 Lista de materiales (BOM) y Estructura de Fabricación y de Producto⁶

Desde el punto de vista del control de la producción interesa la especificación detallada de los componentes que intervienen en el conjunto final mostrando las sucesivas etapas de la fabricación.

La **estructura de fabricación** es la lista precisa y completa de todos los materiales y componentes que se requieren para la fabricación o montaje del producto final reflejando el modo en que la misma se realiza. Varios son los requisitos para definir esta estructura:

1. Cada componente o material que interviene debe tener asignado un único código que lo identifique de forma biunívoca.
2. Debe de realizarse un proceso de racionalización por niveles. A cada elemento o ítem le corresponde un nivel en la estructura de fabricación de un producto asignado en sentido descendente. Así, por ejemplo, al producto final le corresponde el nivel cero. Los componentes y materiales que intervienen en la última operación de montaje son de nivel uno y así sucesivamente.

Para explicar la **estructura de producto** suponemos que nos encontramos en una empresa fabricante de maquinaria especial donde la estructura de fabricación aplicada tiene los siguientes niveles de integración:



Cuadro 10.1. Estructura de producto.

La **estructura del producto** para el ítem: "eje XX", por ejemplo, estaría dada por un código que identifica a la pieza inserta dentro de la estructura de fabricación. Una posible clasificación podría ser:



Fig.10.3. Eje "XX".

Ítem "eje XX" 04 - 21.6.23569

04: indica el nivel de integración de la pieza. En el ejemplo pertenece al grupo "repuestos".

21: sección a la que pertenece.

6: Tipo de material - Acero

23569: nº de pieza

⁶ Ver ANEXO G: "Estructura de Producto"

Cuando la pieza pertenezca al nivel de integración 04 indica que el ítem ha pasado por el nivel 06 en el cual se especifica el tipo y clase de material. En el ejemplo indicaría el código que representa al acero particular.

10.1.6. Gestión de Stock o Estado del Inventario

Recoge las cantidades de cada una de las referencias de la planta que están disponibles o en curso de fabricación. En este último caso ha de conocerse la fecha de recepción de las mismas.

Para el cálculo de las necesidades de materiales que genera la realización del programa maestro de producción se necesitan evaluar las cantidades y fechas en que han de estar disponibles los materiales y componentes que intervienen. El sistema de información referido al estado del stock ha de ser muy completo coincidiendo en todo momento las existencias teóricas con las reales y conociendo el estado de los pedidos en curso para vigilar el cumplimiento de los plazos de aprovisionamiento.

10.2 Sistemas MRP II

10.2.1 Concepto de MRP II

Según la mecánica del MRP I resulta obvio que es posible planificar a partir del Plan Maestro de Producción no solamente las necesidades netas de materiales (interiores y exteriores) sino de cualquier elemento o recurso, siempre que pueda construirse algo similar a la Lista de Materiales que efectúe la pertinente conexión, por ejemplo: horas hombre, horas máquina, contenedores, embalajes, etc. Así se produce paulatinamente la transformación de la Planificación de Necesidades de Materiales en una **“Planificación de Necesidades del Recurso de Fabricación”**, que es a lo que responde las siglas del **MRP II**.

Sin embargo hay otros aspectos que suelen asociarse al MRP II. Uno de ellos es el establecimiento de unos procedimientos para garantizar el éxito del sistema que incluyen las fases anteriores al cálculo de las necesidades: las de preparación y elaboración del Plan Maestro.

Otro aspecto incluido al MRP II es la posibilidad de simulación para apreciar el comportamiento del sistema productivo (o de la empresa) en diferentes hipótesis sobre su constitución o sobre las solicitudes externas. Debemos convenir que cualquier sistema MRP realiza una simulación respecto a acontecimientos futuros; es la extensión de estas posibilidades lo que se solicita para el MRP II.

Finalmente, la última característica que se asocia generalmente con MRP II es el control en bucle cerrado, lo que claramente lo hace trascender desde un simple sistema de planificación. Se pretende de esta forma que se alimente al sistema MRP II con los datos relativos a los acontecimientos que se vayan sucediendo en el sistema productivo, lo que permitirá al primero realizar las sucesivas replanificaciones con un mejor ajuste a la realidad.

10.2.2 Características del sistema

MRP II es una filosofía llevada a la práctica en la gestión de negocios; ha sido adoptada e implantada en un gran número de compañías y éstas ya se están notando los beneficios de operar de esta manera.

MRP II proporciona un cambio importante en control. Los sofisticados sistemas y procedimientos incorporados proporcionan respuestas equilibradas y consistentes que permiten la toma de decisiones correctas mediante el planteamiento de las preguntas claves de cualquier empresa manufacturera:

- ¿Qué vamos a fabricar?
- ¿Qué se necesita para su fabricación?
- ¿De qué disponemos?

- ¿Qué necesitamos conseguir?

Se sabe que MRP II es aplicable a cualquier tipo de empresa y sector. Por ejemplo en el caso del Mantenimiento las preguntas serían:

- ¿Qué tipo de mantenimiento se va a realizar en la planta?
- ¿Qué materiales se necesita para realizar el mantenimiento?
- ¿De qué disponemos?
- ¿Qué necesitamos conseguir?

El MRP II mejora la capacidad organizativa con el fin de competir efectivamente pero hay que recordar que, en un sistema constituido por personas, es vital el compromiso, apoyo y entusiasmo que demuestre tener el personal.

10.2.3 Niveles del MRP II

El MRP II consta de cinco niveles. Cuatro de ellos son de planeamiento y uno de control y producción. Cada nivel responde a: ¿cuánto y cuándo se va a producir? y ¿cuáles son los recursos disponibles?, teniendo en cuenta para esto la capacidad de la empresa.

PRIMER NIVEL: Plan Empresarial. De acuerdo a los informes elaborados desde la dirección de la empresa respecto a la condición futura del sector industrial se prevé la compra de alguna maquinaria o herramental necesario para llevar a cabo una estrategia y aumentar los niveles de producción de las mismas considerando las exigencias del mercado y sus niveles de demanda.

SEGUNDO NIVEL: Plan Agregado Empresarial. En este plan se agrupan los recursos disponibles incluyendo las maquinarias previstas para llevarlo a cabo. Al evaluar los recursos se analiza el costo para realizar el mantenimiento, la cantidad de personal necesaria, etc. Cada agrupación de maquinaria requiere de su propio plan.

TERCER NIVEL: Plan Maestro de Producción. Se refiere a la elaboración de las necesidades de recursos. En este plan se define la programación de los diferentes tipos de procesos en detalle. Se elabora en concordancia con las demás área de producción para así lograr el cumplimiento del Plan Maestro de Producción.

CUARTO NIVEL: Plan de Requerimientos de Materiales (MRP I). El plan maestro de mantenimiento es la fuerza que mueve el sistema MRP I que procesa la lista de materiales y los stocks y muestra los requerimientos señalados en el tiempo para la salida y recepción de materiales. Con ello se sabe cuánto y cuándo debe adquirirse el material o repuesto para el momento en que se va a utilizar.

QUINTO NIVEL: Programación y Control de Taller. La coordinación de todas estas actividades lo realiza el jefe de mantenimiento quien programa en forma semanal la función de cada trabajador derivado a las diferentes máquinas de acuerdo a las habilidades.

Tabla 10.1. Niveles del MRP.



10.3 Ventajas y Desventajas generales

Las principales **ventajas** de los sistemas MRP:

- Capacidad para fijar los precios de manera competente.
- Reducción de los precios de venta.
- Reducción del inventario.
- Mejor respuesta a las demandas del mercado.
- Capacidad para cambiar el programa maestro.
- Reducción de los costos de preparación y desmonte.
- Reducción de tiempos de inactividad.
- Suministrar por anticipado, de manera que los gerentes puedan ver el programa planeado.
- Indicar cuándo demorar y cuando agilizar.
- Demorar o cancelar pedidos.
- Cambiar las cantidades de los pedidos.
- Agilizar o retardar la fecha de los pedidos.

Los principales problemas de los sistemas MRP se encuentran basados en las fallas del proceso de instalación. Los factores más importantes se presentan a nivel organizacional y de comportamiento. Se han identificado tres causas principales: la falta de compromiso de la alta gerencia, el hecho de no reconocer que la MRP es solo una herramienta de software que no genera toma de decisiones y la integración de la MRP y el JIT.

La MRP debe ser aceptada por la alta gerencia como una herramienta de planeación con referencia específica a los resultados de las utilidades, por lo cual es necesaria una educación del área ejecutiva sobre el énfasis de la importancia de la MRP como instrumento de planeación estratégica, integrado y de ciclo cerrado.

La segunda causa de problemas es que las MRP se presentaron y se percibieron como un sistema completo y único para manejar una compañía y no como una parte del sistema total. Otro de los puntos que presenta grandes quejas por parte de los usuarios es que las MRP requieren de una gran exactitud para funcionar correctamente.

CAPITULO XI

Sistemas ERP



11. SISTEMAS ERP

11.1 Concepto de ERP

En una compañía el que un cliente haga un pedido representa la creación de una orden de venta la cual desencadena el proceso de producción, de control de inventarios, la planificación de distribución del producto, la cobranza y, por supuesto, sus respectivos movimientos contables.

En la era de la información tecnológica el sistema **ERP**, "**Enterprise Resource Planning o Sistema de Planificación de Recursos Empresariales**", presenta una forma de relacionar ordenadamente todas estas áreas entre sí para contribuir a un objetivo común: agilizar, desburocratizar y contar con información al día sobre clientes, ventas, proveedores, producción, etc.

Generalmente cada departamento en una empresa o industria posee su propio sistema informático, aislado de los demás sectores. El ERP lo que hace es combinar todos ellos juntos en un sólo programa de software integrado que trabaja con una base de datos común y así todas las transacciones quedan registradas desde su origen permitiendo consultar en línea cualquier información relevante. De esta forma todos los departamentos están interconectados y pueden de manera óptima compartir información y comunicarse entre sí. Esto ahorra tiempo, evita el procesamiento sobre papel así como el reingreso de datos en varias computadoras disminuyendo el margen de error.

Este concepto integrador puede generar un gran retorno financiero si las empresas implementan el software adecuadamente brindando como beneficio control y visualización de las operaciones, eficiencia administrativa, productividad, servicio a clientes, ahorro en costos operativos y soporte para la toma de decisiones.

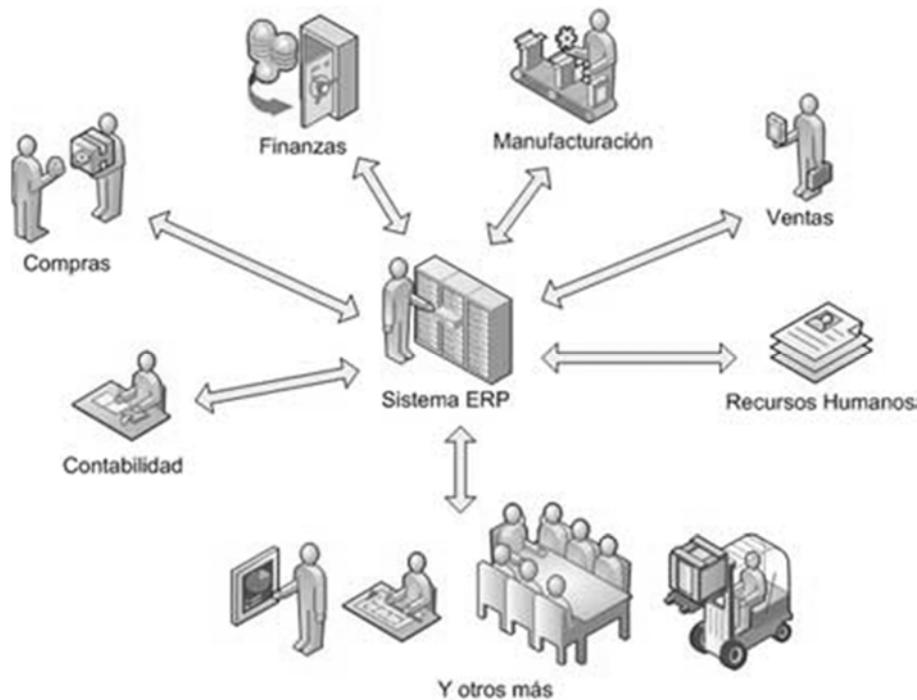


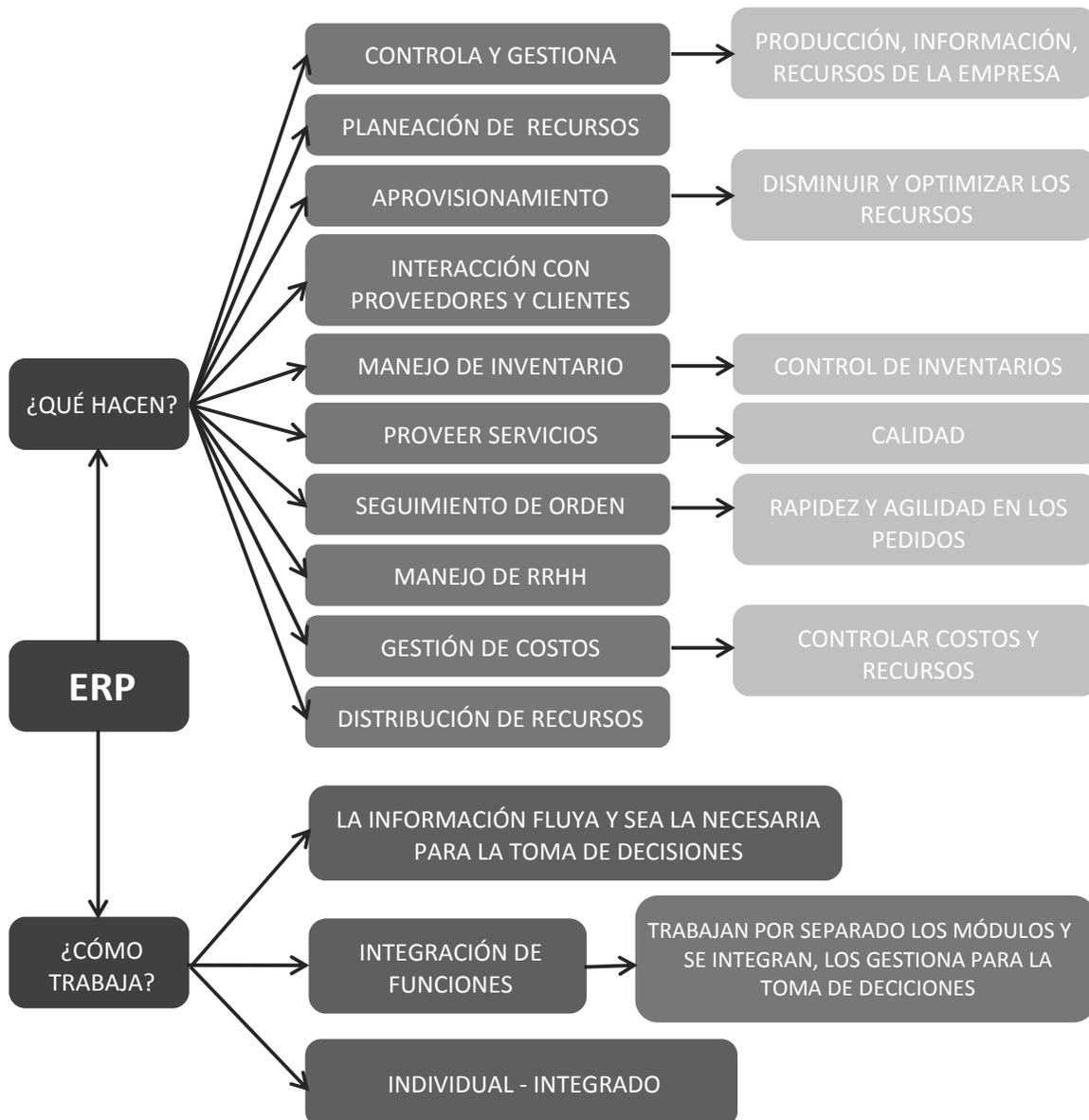
Fig.11.1. Relaciones en un ERP.

11.2 Objetivos

Los objetivos principales de los sistemas ERP son:

- Optimización de los procesos empresariales.
- Acceso a la información.
- Posibilidad de compartir información entre todos los componentes de la organización.
- Eliminación de datos y operaciones innecesarias de reingeniería.

El propósito fundamental de un ERP es otorgar apoyo a los clientes del negocio, tiempos rápidos de respuesta a sus problemas, así como un eficiente manejo de información que permita la toma oportuna de decisiones y disminución de los costos totales de operación.



11.3 Características del sistema

Las características que distinguen a un ERP de cualquier otro software empresarial es que deben de ser sistemas integrales, modulares y adaptables.

- **Integrales**, porque permiten controlar los diferentes procesos de la compañía entendiendo que todos los departamentos de una empresa se relacionan entre sí, es decir, que el resultado de un proceso es punto de inicio del siguiente. Por ejemplo, en una compañía el cliente hace un pedido y con el ERP el operador simplemente captura el pedido y el sistema se encarga de todo lo demás (desencadena el proceso de producción y controles, de planificación y distribución del producto), por lo que la información no se manipula y se encuentra protegida.
- **Modulares**. Los ERP entienden que una empresa es un conjunto de departamentos que se encuentran interrelacionados por la información, los cuales al ser módulos pueden acomodarse de acuerdo con los requerimientos del cliente. Ejemplo: ventas, materiales, finanzas, control de almacén, recursos humanos, etc.
- **Adaptables**. Los ERP están creados para adaptarse a la idiosincrasia de cada empresa. Esto se logra por medio de la configuración o parametrización de los procesos de acuerdo con las salidas que se necesiten de cada uno.

Otras características destacables de los sistemas ERP son:

- Base de datos centralizada.
- Los componentes del ERP interactúan entre sí consolidando todas las operaciones.
- En un sistema ERP los datos se ingresan sólo una vez y deben ser consistentes, completos y comunes.
- Las empresas que lo implanten suelen tener que modificar alguno de sus procesos para alinearlos con los del sistema ERP. Este proceso se conoce como Reingeniería de Procesos, aunque no siempre es necesario.
- Aunque el ERP pueda tener menús modulares configurables según los roles de cada usuario, es un todo. Esto es: es un único programa (con multiplicidad de librerías) con acceso a una base de datos centralizada. No debemos confundir en este punto la definición de un ERP con la de una suite de gestión.
- La tendencia actual es a ofrecer aplicaciones especializadas para determinadas empresas. Es lo que se denomina versiones sectoriales o aplicaciones sectoriales especialmente indicadas o preparadas para determinados procesos de negocio de un sector (los más utilizados).

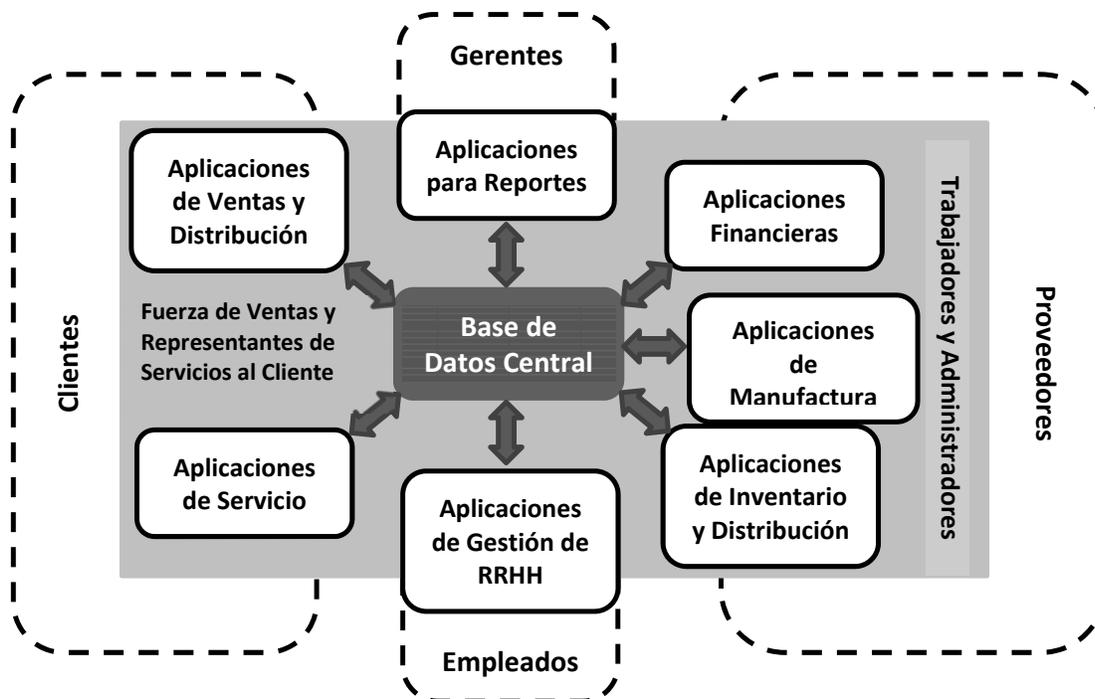


Fig.11.3. Características de los ERP.

11.4 Implementación

A la hora de implementar un sistema ERP, se lo debe llevar a cabo en forma gradual debido a que la reorganización provoca cambios en los sistemas internos y estructura de la empresa. Es importante definir alcances y límites del sistema. El ERP da aplicaciones que brindan servicios a diferentes procesos y cada uno es diferente a otro.

Para tener buenos resultados y muchas probabilidades de éxito se necesita concientizar a todos los usuarios sobre los beneficios y escuchar sus requerimientos. Esto debe ser un trabajo en conjunto ya que incluye todas las áreas de una compañía siendo vital que desde el primer momento la alta dirección se encuentre involucrada en el proyecto.

Dentro de los ítems a tener en cuenta está la infraestructura tecnológica que posea la empresa. Es importante consultar al momento de adquirir una herramienta informática con qué equipos se debe contar para poder aplicarla ya que éstos serán costos a enfrentar. Otro factor para asegurar el éxito del proyecto es fortalecer la relación con el proveedor del sistema y tener en cuenta el grado de experiencia de éste con empresas similares.

Para obtener un beneficio completo la empresa debe ver más allá de un sistema y su utilización; debe comprender que se trata de mejorar el desempeño mediante información propia, confiable y actualizada.

11.5 Ventajas y Desventajas

Como se ha mencionado anteriormente la principal ventaja de los ERP es la gestión en tiempo real de la información, una ventaja que las empresas agradecen mucho por su fuerte interacción con la logística de información y productos, la cadena de abastecimiento, estadísticas financieras y otras áreas que utilizan información que cambia constantemente.

La correcta implementación de los ERP repercute en el aumento de productividad de todos los departamentos, así como el mejor aprovechamiento del tiempo. Donde antes se necesitaba tiempo para llevar un informe de un departamento a otro, ahora es utilizado en otras funciones.

Aunque los sistemas ERP puedan generar un incremento de productividad, para muchas empresas es casi imposible pagar el costo de las licencias, implementación y sobre todo del mantenimiento del mismo ya que son sistemas dinámicos; de nada sirve tener el mismo sistema en una empresa que crece y cambia día a día.

El manejo del **ERP** tiene sus desventajas: se necesita instruir a los trabajadores de cada módulo que se vaya a asignar. La especialización de los trabajadores genera un costo y tiempo que tiene que emplear la persona para hacer un cambio en su estructura operativa, lamentablemente la resistencia al cambio presenta un problema muy grande en este punto.

CAPITULO XII

Prototipado Rápido



12. SISTEMAS DE PROTOTIPADO RÁPIDO

12.1 Nociones General

El Prototipado Rápido podemos definirlo como un conjunto de tecnologías que permiten la obtención de prototipos, machos, moldes de inyección para plásticos, electrodos de erosión, etc. en menos de 24 horas a partir de un fichero CAD. Consecuencia de esta rapidez de respuesta es que el tiempo de desarrollo de un producto puede reducirse drásticamente.

El prototipado rápido (**RP** por sus siglas inglesas de **"Rapid Prototipe"**) da la posibilidad de efectuar, en un tiempo relativamente corto, diversas pruebas de geometrías distintas para una pieza, validar la geometría definitiva y acometer la producción en serie rápidamente con unos costes de desarrollo lo más ajustados posibles. La complejidad de las piezas o la confidencialidad de los prototipos son también argumentos frecuentes a la hora de optar por el RP.

Dentro de la denominación de "prototipado rápido" no se suele incluir al Mecanizado de Alta Velocidad (MAV).



Fig.12.1. Elementos de prototipado.

12.2 Aplicaciones del prototipado rápido⁷

El **objetivo principal** del Prototipado Rápido es obtener de manera rápida y más o menos exacta una réplica tridimensional de los diseños que han sido generados mediante aplicaciones CAD en 3D.

Estos modelos físicos pueden ser únicamente estéticos o útiles para el estudio de formas y el análisis de la aceptación por el mercado potencial al que van dirigidos. En algunos casos los prototipos tienen características tales que existe la posibilidad de realizar pruebas funcionales.

Estas técnicas pueden ser aplicadas a las más diversas áreas tales como automoción, aeronáutica, marketing, restauraciones, educación, medicina, arqueología, paleontología y arquitectura.

De acuerdo a la función a cumplir se establece una clasificación de los modelos o prototipos:

⁷ Ver ANEXO H: "Proyecto RepRap"

Grupo Diseño, Gestión y Desarrollo de Nuevos Productos

- **Modelos volumétrico-dimensionales:** no son más que una aproximación volumétrica, una caracterización formal que facilita la percepción sensorial (aspecto, peso, textura) del objeto pero que no tiene porqué ser una réplica perfecta y/o a escala del producto final.
- **Modelos funcionales:** permiten la comprensión de objetos compuestos por múltiples piezas, elementos modulares, etc.

Los dos tipos anteriores corresponden al término inglés **“Mock-Up”**.

- **Modelos experimentales:** permiten realizar sobre ellos ensayos y pruebas para verificar si las especificaciones que se le suponían realmente se cumplen. También se pueden utilizar para la obtención de moldes.
- **Modelos orientados a la fabricación:** se utilizan para simular el proceso de fabricación y evidenciar posibles cuellos de botella o problemas que pudieran surgir durante el mismo.
- **Modelos ergonómicos:** son aquellos que permiten conocer la interacción del objeto con el usuario. Es muy recomendable realizarlos a escala 1:1.

Las tres tipologías anteriores se pueden identificar con la denominación inglesa de **“Prototype”**.

- **Modelos estéticos, maquetas o “Models”:** son aquellos que se van a utilizar para dar a conocer el objeto a personas ajenas al proceso de diseño y que por lo tanto deben ser agradables a la vista ya que contribuyen a la promoción y venta del mismo.
- **Modelos para la obtención de moldes prototipo o “Masters”:** son aquellos que se emplean para el diseño de moldes a partir de los cuales se pueden obtener pequeñas series (10 – 15 elementos) y verificar el diseño de ellos.
- **Modelos para la obtención de moldes de preseries de fabricación llamados “Patterns”:** estos modelos están a medio camino entre el prototipado y la producción ya que en función del material empleado se pueden obtener moldes para producir entre 100 y 10.000 piezas que permiten comprobar si el mercado acepta o no el producto antes de invertir en un molde más caro y duradero.

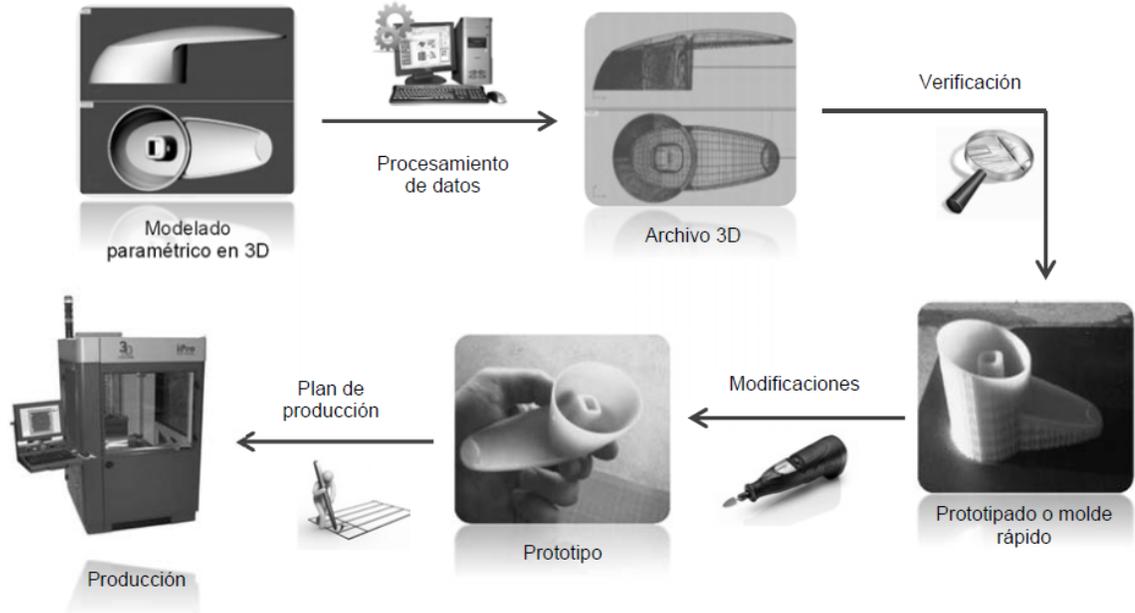
12.3 Fases generales de los procesos

A continuación trataremos de manera general los pasos a seguir para realizar los prototipos

- 1) El diseñador define su idea y genera un modelado en 2D que luego deberá exportar a un software de modelado 3D o bien lo crea directamente en éste último.
- 2) El modelo 3D permitirá comprobar zonas de curvatura crítica y realizar correcciones desde esta misma fase del proyecto. Además este modelo permite crear una representación fotorealista del producto con sus dimensiones, volumen, texturas, etc. (rendering).
- 3) Una vez que se aprueba el diseño exterior se procederá a comprobar el montaje y funcionamiento de las piezas que componen el producto.
- 4) Ya aprobado el diseño y de ser verificado el correcto funcionamiento, los datos 3D se utilizan para la fabricación del prototipo o molde rápido.
- 5) Podría ser necesario, en el caso general, introducir modificaciones para mejorar la fabricación de estas piezas y obtener el prototipo final. Por ejemplo en algunos casos se procede a lijar o limar asperezas superficiales producidas por el sistema de prototipado elegido.
- 6) Terminado el prototipo y verificadas las propiedades o características de interés se procede a la generación del programa de producción.

La mayor o menor similitud que pudiera existir entre el modelo definitivo y el obtenido mediante las técnicas de prototipado rápido dependerán básicamente del sistema utilizado para su generación y de limitaciones dimensionales, de complejidad y de postprocesos aplicados.

12.4 Técnicas más difundidas de Prototipado



Bajo el nombre de prototipado rápido se agrupan a una serie de tecnologías distintas de construcción de sólidos. Todas ellas parten del corte en secciones o capas horizontales paralelas de piezas representadas en CAD. Éstas caracterizan a todas las tecnologías de prototipado rápido que construyen las formas sólidas a partir de la superposición de las capas horizontales.

Las tecnologías más difundidas son en la actualidad:

12.4.1 SLA: ESTEREOLITOGRAFÍA

12.4.2 POLIMERIZACIÓN TÉRMICA DE LÍQUIDOS

12.4.3 SGC: FOTOPOLIMERIZACIÓN POR LUZ UV

12.4.4 FDM: DEPOSICIÓN DE HILO FUNDIDO

12.4.5 SHAPE MELTING

12.4.6 SPI: INYECCIÓN SOLIDA POR IMPRESIÓN

12.4.7 SLS: SINTERIZACIÓN SELECTIVA LÁSER

12.4.8 LOM: FABRICACIÓN POR CORTE Y LAMINADO

12.4.9 3DP: IMPRESIÓN 3D

12.4.10 MJM: THERMOJET

12.4.11 BPB: FABRICACIÓN MEDIANTE BALÍSTICA DE PARTÍCULAS

12.4.12 HIS: SOLIDIFICACIÓN POR INTERFERENCIA HOLOGRÁFICA

12.4.13 ESTRATOCONCEPCIÓN

12.4.14 PROTOTIPADO VIRTUAL

En general se reserva la fabricación de precisión a la estereolitografía y cuando se valoran más las prestaciones mecánicas del modelo (prototipos funcionales) se prefiere el sinterizado que ofrece más variedad de materiales: resinas fotosensibles, materiales termofusibles, metales, cerámica, papel plastificado.

12.4.1. SLA: Estereolitografía

Esta técnica se basa en la posibilidad de solidificar una resina en estado líquido mediante la proyección de un haz láser de una frecuencia y potencia muy concretas.

El proceso empieza con la plataforma o mesa situada a una distancia de la superficie del líquido igual al grosor de la primera sección a imprimir. El láser sigue la superficie de la sección y su contorno mientras el líquido expuesto a la radiación ultra-violeta se va solidificando debido a sus características de fotopolímero. Una vez solidificada esta sección, el elevador baja la plataforma para situarse a la altura de la siguiente lámina y se repite dicha operación hasta conseguir la pieza final.

En este tipo de sistemas la creación de los prototipos se inicia en su parte inferior y finaliza en la superior. El hecho de que la resina inicialmente se encuentre en estado líquido conlleva la necesidad de generar no sólo la geometría correspondiente a la pieza a crear sino, además, una serie de columnas que permitan soportar la pieza a medida que ésta se va generando. De no ser así las distintas capas o voladizos que son necesarios caerían al no ser autosoportados por la resina líquida no solidificada.

Para obtener unas características mecánicas óptimas en las piezas generadas los prototipos son sometidos a un post-curado en un horno especial de rayos UVA.

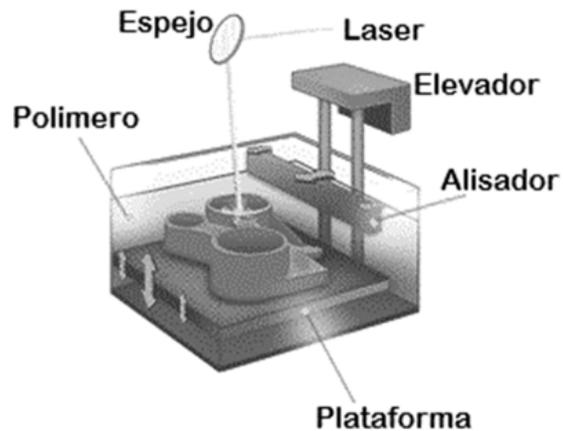


Fig.12.3. Estereolitografía – Rep. Gráfica del sistema.

Ventajas complementarias:

- Los prototipos son translúcidos, lo cual puede ser especialmente ventajoso para determinados proyectos o para detectar interferencias interiores en conjuntos complejos.
- Tiene una precisión dimensional y un acabado superficial especialmente destacable.
- Esta técnica suele ser recomendable para piezas de dimensiones reducidas o que contengan pequeños detalles que han de definirse de manera muy clara.

Desventajas:

- Uso de resinas caras, de mal olor y tóxicas que deben ser protegidas de la luz para evitar una prematura polimerización.
- Los modelos resultan frágiles y traslúcidos.
- Necesidad de soportes que pueden afectar al acabado superficial.

Esta técnica es útil para la obtención de modelos volumétricos, funcionales y estéticos así como para la fabricación de “masters” para la obtención de moldes prototipo.

12.4.2 Polimerización Térmica de Líquidos

Se trata de una técnica análoga a la estereolitografía diferenciándose en el polímero utilizado (térmico en lugar de fotopolímero) y por tanto la solidificación se produce por calor en vez de por luz.

El principal inconveniente de esta técnica es la dificultad para controlar las contracciones térmicas causadas por los diferentes e inevitables cambios de temperatura.

12.4.3. SGC: Fotopolimerización por Luz UV

Al igual que en la estereolitografía esta tecnología se basa en la solidificación de un fotopolímero o resina fotosensible. En la fotopolimerización, sin embargo, se irradia con una lámpara de UV de gran potencia todos los puntos de la sección simultáneamente.

El proceso consiste en espolvorear una lámina cargada electrostáticamente de tal forma que contiene el negativo de la capa a fabricar. A continuación se sitúa dicha máscara sobre la superficie de soporte en la que previamente se ha depositado una fina capa de fotopolímero líquido. Posteriormente se activa una fuente de radiación que solidifica la zona deseada quedando el resto en forma líquida, lo que permite su recogida y reutilización.

Finalmente se aplica una capa de cera a la superficie formada para tapar los huecos que hayan podido quedar, se mecaniza dicha superficie y se vuelve a repetir el proceso.

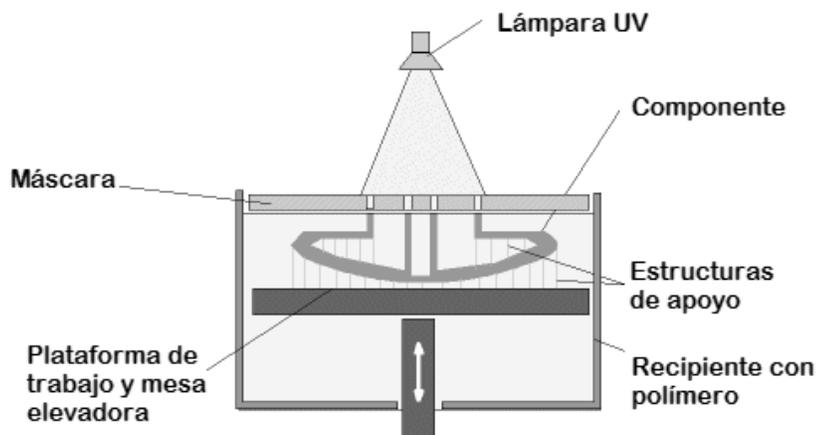


Fig.12.4. Técnica de fotopolimerización por luz.

Ventajas:

- Menor tiempo de construcción del modelo que en SLA.
- Mayor resistencia que el SLA ya que las distintas capas se generan de una sola vez.
- No se requiere postcurado.
- No son necesarios soportes.

Desventajas:

- Uso de resinas caras, de mal olor y tóxicas que deben ser protegidas de la luz para evitar una prematura polimerización.

Grupo Diseño, Gestión y Desarrollo de Nuevos Productos

- Los modelos resultan frágiles y traslúcidos.
- Necesidad de soportes que pueden afectar al acabado superficial.

Esta técnica permite crear modelos estéticos y dimensionales y sólo en algunos casos modelos funcionales y experimentales.

12.4.4 FDM: *Deposición de Hilo Fundido*⁸

El sistema FDM es la tecnología de prototipado más usada después de la estereolitografía.

Consiste en un filamento de plástico que se desenrolla de una bobina y abastece de material a una boquilla de extrusión que calienta el material hasta dejarlo en un estado líquido-pastoso. A medida que la boquilla se desplaza por la mesa deposita una fina capa de plástico extruido (cuyo grosor puede regularse) siguiendo la geometría indicada. El plástico se endurece inmediatamente después de salir de la boquilla y se adhiere a la capa de abajo. De esta manera el cabezal va imprimiendo por capas hasta completar los prototipos.

Cuando la pieza tiene voladizos la maquina extruye un segundo material de soporte (por una segunda boquilla) que se elimina fácilmente. El sistema puede tener múltiples boquillas con distintos materiales como ABS, de buena resistencia, y PLA, material de soporte.

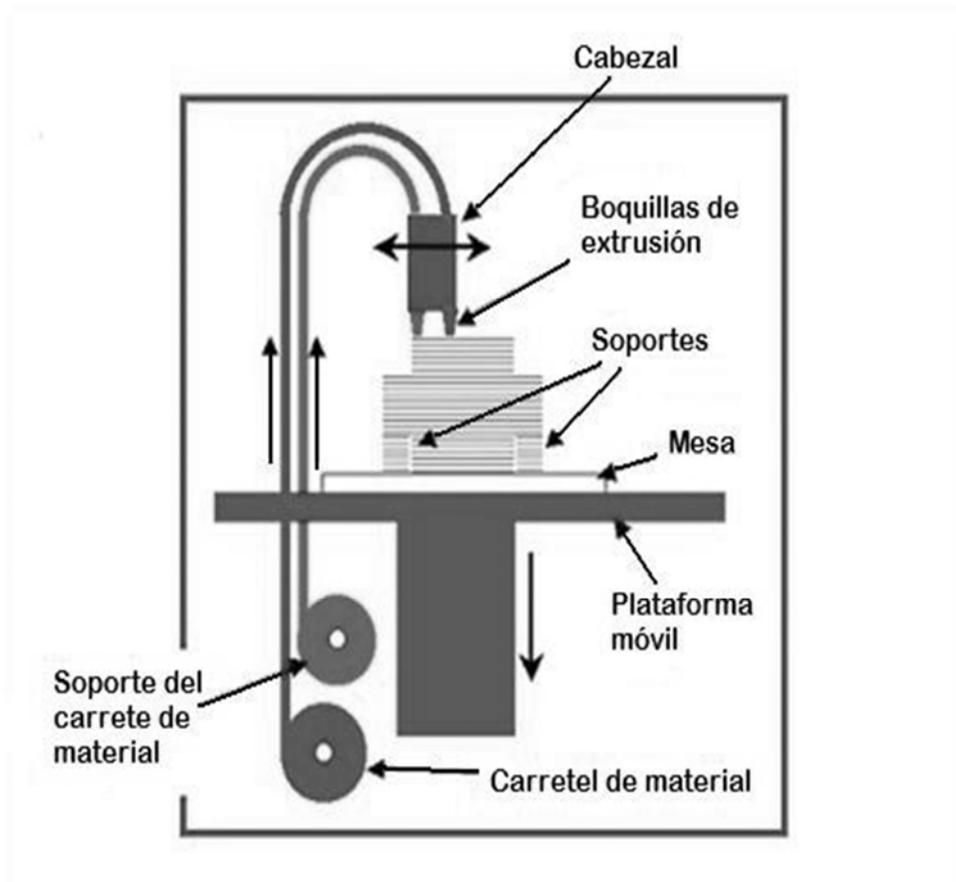


Fig.12.5. Tecnología FDM.

⁸ Ver ANEXO I: "Prototipado en sistema FDM"

Los prototipos obtenidos por este proceso son mayormente para conceptualizaciones o presentaciones. En cuanto a las características de la pieza, éstas pueden resultar muy precisas y livianas, aptas para pruebas funcionales. Además el acabado superficial no es demasiado bueno pero el material se puede lijar, mecanizar y pintar. Por último, tienen bajo coste pero puede tomar mucho tiempo su generación.

Ventajas:

- La máquina de prototipado puede estar en la oficina de diseño ya que los materiales que usa son baratos, no tóxicos, inodoros y medioambientalmente seguros.
- Permite el uso de una gran variedad de materiales.
- Proceso rápido cuando las piezas son pequeñas y huecas y con generación nula de residuos.
- Los modelos presentan una gran estabilidad.
- Proceso adecuado para fabricar pequeños detalles.

Desventajas:

- El acabado superficial no es demasiado bueno.
- Son necesarios soportes.
- Lentitud en piezas grandes o gruesas.
- Escasa consistencia vertical.

Esta técnica permite obtener modelos de casi todos los tipos excepto los experimentales.

12.4.5 Shape Melting

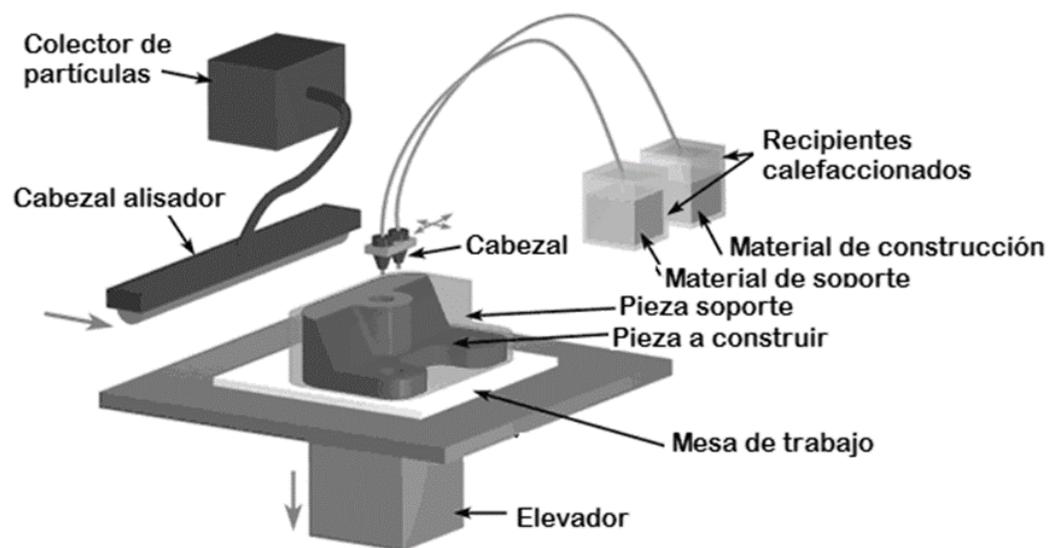


Fig.12.6. Inyección sólida por Impresión.

Variante de la técnica anterior que permite obtener piezas metálicas. Las bandas o cintas de metal se derriten y depositan mediante arco voltaico.

Ventajas:

- Producción de modelos con buenas características mecánicas.

Desventajas:

- No es posible obtener precisiones inferiores a 1 mm.
- Es problemática la construcción de piezas menores de 7 mm.

12.4.6 SPI: Inyección Sólida por Impresión

En esta técnica dos cabezales eyectores recorren cada una de las capas depositando material en estado líquido que se va solidificando al enfriarse. Uno de los eyectores deposita el termoplástico que construirá el prototipo y el otro la cera que servirá como soporte.

Ventajas:

- Producción de modelos con buenas características geométricas.
- Posibilidad de obtener modelos con paredes estrechas.

Desventajas:

- Gran desperdicio de cera.

12.4.7 SLS: Sinterización Selectiva Láser

En este caso, en lugar de utilizar un fotopolímero, se utilizan polvos de diferentes materiales. Un láser sinteriza las áreas seleccionadas causando que las partículas se fusionen y solidifiquen. El modo de generación de las piezas es similar al que se explica en la sección dedicada a la estereolitografía, en el que los elementos son generados de capa en capa, iniciando el proceso por las cotas más bajas y terminados por las superiores.

Puede decirse que constituye el primer proceso de aglomeración con importancia industrial, desarrollado para la industria siderúrgica, ya que permite la conversión de una gran variedad de materiales tales como finos de mineral de hierro.

El proceso se lleva a cabo en una cadena móvil (dividida en compartimientos) que recibe la mezcla de materiales que contienen hierro junto con un combustible, generalmente coque fino, los cuales deben estar homogéneamente mezclados para garantizar un “quemado” uniforme.

Antes de comenzar con el proceso un rodillo nivela la superficie de material sólido en el compartimiento de trabajo para que luego el láser sinterice la primera capa de la pieza. Una vez que se completa el primer plano la base de la caja de trabajo desciende y el rodillo vuelve a nivelar el material arrastrando al mismo desde otro compartimiento. De este modo el láser realiza la segunda capa y el proceso continúa hasta completar la pieza.

Dado que la materia prima se encuentra en estado sólido (se trata de microesferas) no es necesario generar columnas que soporten al elemento mientras éste se va creando por lo que no existen limitaciones de rotación de pieza como consecuencia de ello ni la necesidad de eliminarlas posteriormente.

En contrapartida, la cámara en la que se generan las piezas se encuentra a una temperatura elevada por lo que es necesario ser cuidadoso con la orientación de las mismas que se van a generar con el fin de evitar gradientes térmicos importantes que podrían torsionarlas. Para obtener unas características

mecánicas óptimas de las piezas generadas los prototipos son sometidos a un post-curado en un horno especial de rayos UVA

Ventajas:

- Al tratarse de una poliamida sus características mecánicas, en muchas ocasiones, son próximas a las que corresponderían al material definitivo.
- Son elementos especialmente indicados para conjuntos en los que se prevé un montaje y

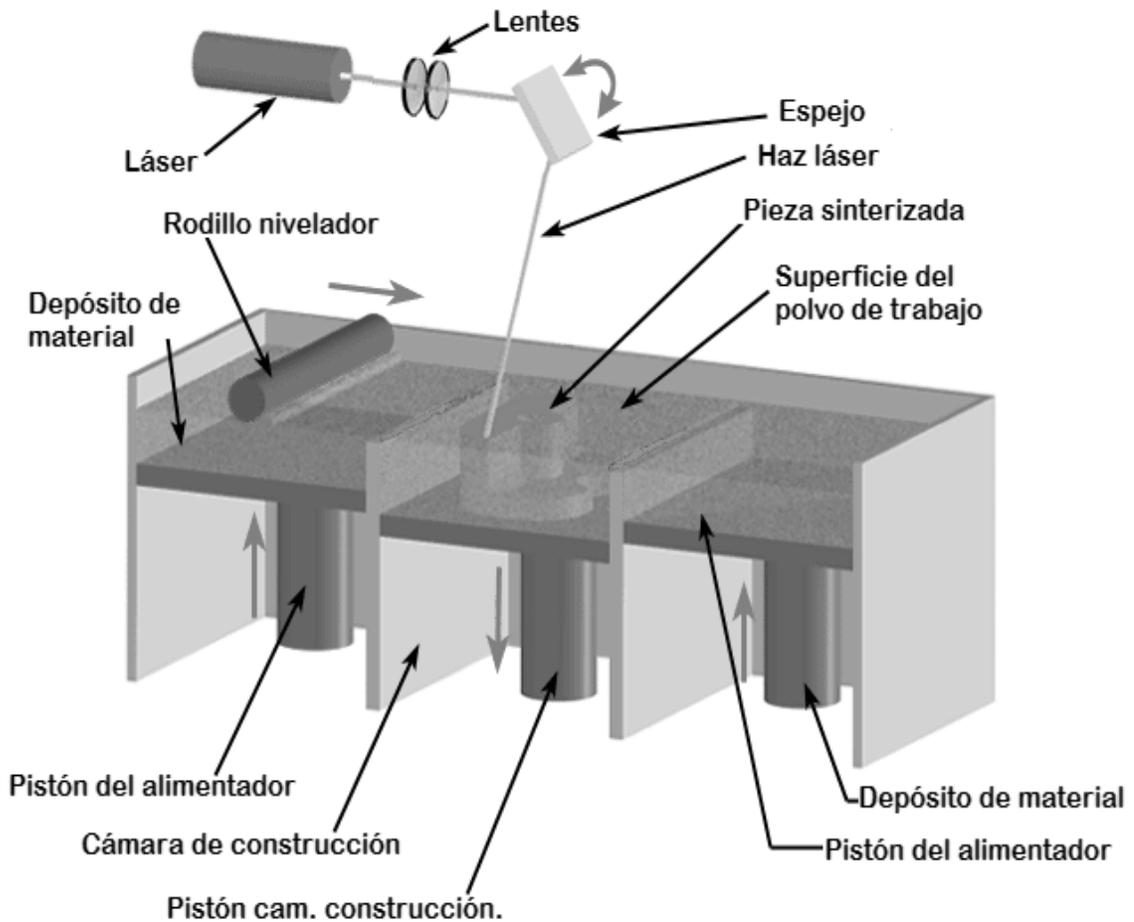


Fig.12.7. Método SLS.

desmontaje en la fase de prueba.

- Soportan temperaturas más elevadas que en el caso de la Estereolitografía.
- Puede utilizar una gran variedad de materiales que proporcionan buenas características mecánicas, son inodoros y de menor precio que las resinas.
- El láser que se utiliza es relativamente poco potente (50 W).
- No se precisa de proceso de postcurado, ni soporte, ni de eliminación de material sobrante.
- Buenas precisiones.

Desventajas:

- Los polvos sobrantes necesitan ser tamizados para eliminar glóbulos gruesos.
- Se requiere una atmósfera inerte rica en nitrógeno.
- Se precisa acabado superficial.

Grupo Diseño, Gestión y Desarrollo de Nuevos Productos

- Es un proceso lento.
- Técnica novedosa poco contrastada.
- Emplea un equipamiento complejo y de difícil mantenimiento.

12.4.8 LOM: Fabricación por Corte y Laminado

Esta tecnología pega y recorta láminas plásticas o de papel. La parte inferior del papel tiene una capa adhesiva que cuando es presionada y se le aplica calor hace que se pegue con el folio anterior. Cada uno de las láminas es recortada siguiendo el contorno de las secciones o láminas en que la pieza fue cortada en el programa de prototipado.

Las principales características de esta técnica son la velocidad, que no requiere otro material de soporte y que permite superar la habitual limitación de tamaño.

Ventajas:

- Posibilidad de utilizar un amplio rango de materiales relativamente baratos.
- Los modelos pueden ser de gran tamaño.
- El proceso es entre 5 y 10 veces más rápido que otros.
- No se necesitan soportes ni postcurado.
- Buena precisión.
- Características mecánicas aceptables.

Desventajas:

- Baja calidad superficial.
- Dificultad para trazar huecos internos.
- Gran cantidad de material desperdiciado.
- Se pueden producir deformaciones térmicas del modelo por acción del láser.
- Sensibilidad a la humedad.

Esta técnica se emplea para obtener modelos estéticos y dimensionales permitiendo en ocasiones los funcionales y experimentales. También es posible utilizarla para construir “masters” y “patterns”.

12.4.9 3DP: Impresión 3D

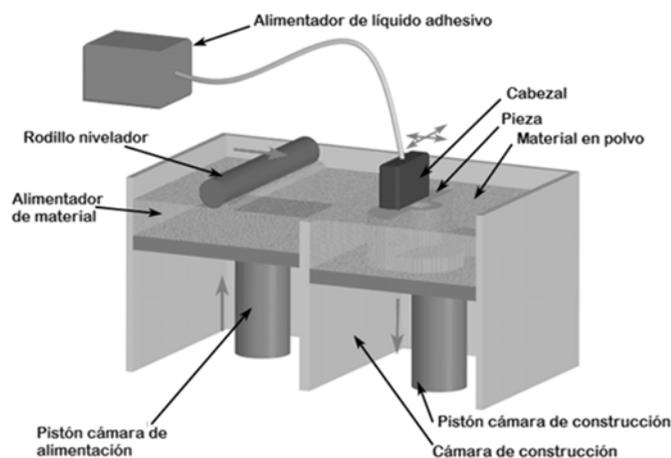


Fig.12.9. Sistema de impresión 3D

El proceso de obtención de la pieza comienza con la deposición de una capa de polvos de material cerámico o metálico y la compresión de los mismos. Tras ello unos cabezales similares a los de las impresoras imprimen con un líquido aglutinante la imagen de la primera de las capas.

Así sucesivamente con el resto de las capas que utilizan como soporte el material sobrante de la anterior. Las buenas características mecánicas del material resultante permiten su utilización como molde.

Ventajas

- No se precisan soportes.
- Materiales baratos.
- Gran precisión.

Desventajas

- Dificultad para eliminar el polvo de algunas cavidades.
- La pieza final puede ser frágil y porosa.
- Es necesario un postcurado.

Permite la construcción de prototipos estéticos y funcionales.

12.4.10 MJM: Thermojet

Es una tecnología de adición capa a capa en la que el material se inyecta a través de unas boquillas en

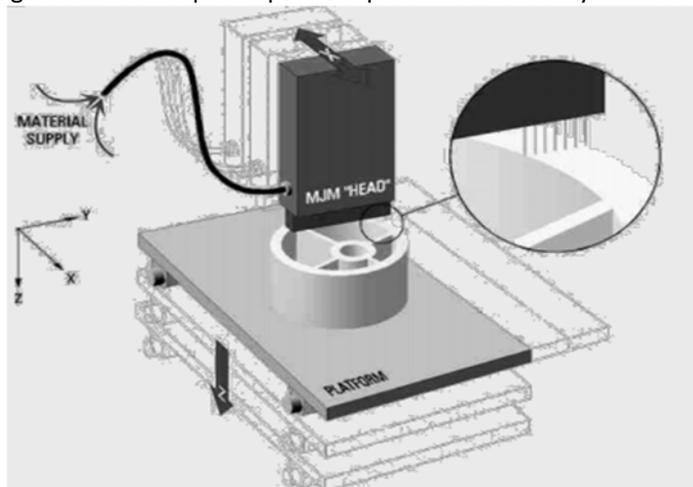


Fig.12.10. Prototipado por medio de tecnología Thermojet.

forma de micro gotas y éstas solidifican al contactar en la superficie depositada.

Las piezas se van construyendo capa a capa y el material utilizado para construir las piezas es **cera** por lo que las piezas construidas de esta forma se utilizan como modelos perdidos para micro fusión.

Cuando las piezas a construir tienen contrasalidas o zonas en voladizo el algoritmo de la máquina genera una especie de hilos (soportes) que no forman parte de ellas y que una vez se ha terminado de construir se eliminan.

Ventajas

- Rapidez y calidad en el prototipo.
- Permite su uso en una oficina.

Desventajas

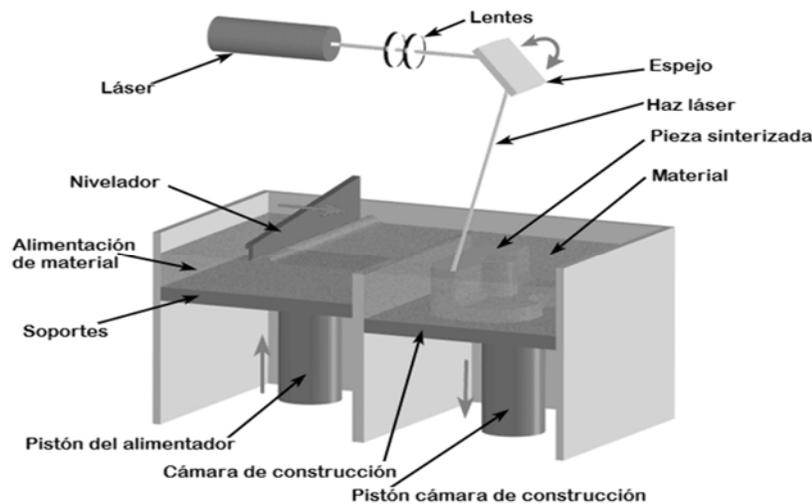


Fig.12.11. Representación de sistema HIS.

- Sólo permite el uso de un reducido número de materiales.

Esta técnica permite confeccionar modelos dimensionales, funcionales y orientados a la fabricabilidad.

12.4.11 BPB: Fabricación mediante Balística de Partículas

Consiste en pulverizar el material en capas a través de una atmósfera de vacío o rica en nitrógeno para evitar la oxidación y/o la dispersión de las gotas.

Es posible el empleo de cualquier material que se derrita y solidifique fácilmente desde los termoplásticos hasta aluminio.

Ventajas:

- Se trata de una técnica barata y respetuosa con el medio ambiente.
- No son necesarios soportes ni post-procesado.
- El equipo puede trabajar en oficina.
- Permite aplicar diferentes materiales y colores en una misma pieza.

Desventajas

- Es necesario elegir entre velocidad y precisión.
- Piezas frágiles.
- Técnica poco contrastada debido a su novedad.
- Precisa de atmósfera inerte rica en nitrógeno.

Debido a su fragilidad los modelos obtenidos mediante BPM únicamente tienen una función estética y poco duradera en el tiempo.

12.4.12 HIS: Solidificación por Interferencia Holográfica

Consiste en solidificar una superficie tridimensional proyectando una imagen holográfica en una cubeta de líquido fotosensible. Entre las aplicaciones más frecuentes de esta técnica se encuentran la producción de modelos para la cera perdida y electrodos de cobre para electroerosión.

12.4.13 Estratoconcepción

En esta técnica se divide la pieza a fabricar en capas o estratos que se fabrican con alguna de las técnicas anteriores y posteriormente se ensamblan para construir el prototipo final.

Ventajas:

- Se pueden obtener piezas de gran tamaño sin limitación de formas.
- Uso de materiales económicos.

Desventajas:

- Se trata de un sistema lento, caro y que requiere de postprocesado.

12.4.14 Prototipado Virtual

No está de más recordar que una de las metodologías de “prototipado” que más se utiliza en los trabajos cotidianos consiste en el denominado “prototipado virtual”, que no es más ni menos que el máximo exponente de las aplicaciones de CAD/CAM.

Por prototipado virtual se entiende el disponer del modelado sólido en el ordenador que nos permita hacer simulaciones y cálculos y diversas pruebas según materiales, condiciones de trabajo, modificación de cotas y formas, Elementos Finitos, renderizados virtuales con distintas texturas y materiales, animaciones, etc , pruebas que nos permitirán depurar los modelos antes de su ejecución material.

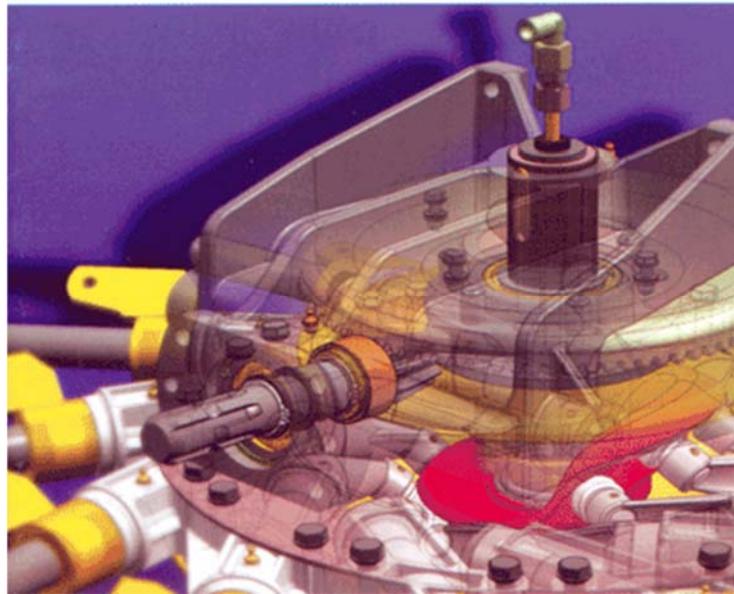


Fig.12.12. Prototipado Virtual .

12.5 Aplicaciones del PR

Los modelos de Prototipado Rápido pueden ser utilizados en:

- **Ingeniería.** La ingeniería precisa continuas pruebas de calidad y de ensamblaje. Mediante archivos CAD el resultado es mucho más complejo que teniendo físicamente el modelo al que poder realizarle todas las pruebas necesarias.
- **Arquitectura.** Las técnicas de creación de maquetas manufacturadas son muy restrictivas. Para determinados proyectos es posible imprimir varias copias de la maqueta o modelo para compartir con diferentes clientes o con distintos segmentos del mercado de usuarios finales. El Prototipado Rápido permite la producción de múltiples piezas con un gasto razonable.
- **Topografía.** En propuestas de construcciones complejas de superficies terrestres, con sus formas y detalles, tanto naturales como artificiales, el Prototipado Rápido proporciona una maqueta 3D para cada diseño. Éstas se pueden usar como herramienta para explicar el alcance y concepto del proyecto.
- **Packaging.** Las empresas que diseñan y producen envases de cristal y plástico para industrias relacionadas con el cuidado corporal, la salud y el cuidado del hogar están usando prototipos 3D para acelerar y mejorar su proceso de diseño. Asimismo el packaging de las industrias químicas, de la automoción o de los fabricantes de bebidas también obtiene grandes beneficios del Prototipado Rápido.
- **Electrodomésticos.** El diseño de electrodomésticos para el hogar requiere no sólo maquetas precisas en 3D para comunicar conceptos de diseño a clientes internos y externos sino también una serie de tests funcionales de piezas para evaluar atributos de actuación importantes en el inicio del ciclo de diseño. La exposición a temperaturas elevadas, la humedad, el flujo de aire y las vibraciones se combinan para presentar condiciones exigentes de entorno que muchas maquetas



Fig.12.13.
Aplicaciones del PR.

conceptuales de primera fase no pueden soportar. **ducación.** El prototipado rápido permitiría desarrollar objetos hechos a medida para satisfacer las necesidades especiales dependiendo de los casos pudiéndose construir cualquier objeto como por ejemplo utensilios pedagógicos para niños con visión reducida o ceguera. En muchas áreas es imprescindible que los alumnos tengan acceso a maquetas físicas de sus proyectos en etapas tempranas del proceso de diseño. De ese modo pueden llegar a comprender y experimentar completamente el ciclo de desarrollo del producto.

- **Modelado molecular.** La forma y la geometría lo son todo en química molecular. Se pueden producir de forma rápida y económica docenas de iteraciones moleculares que pueden manipularse físicamente para entender sus interacciones. Gracias a la velocidad y efectividad de coste del sistema se pueden disponer de manera rutinaria de modelos reales en espacio físico para los trabajos de investigación.

- **Automoción.** El Prototipado Rápido permite a los equipos de diseño cambiar de forma efectiva el diseño conceptual en las fases tempranas del proceso de desarrollo, comprobar el ensamblado de piezas, planificar la producción y realizar maquetas de presentación y réplicas exactas de los modelos de producción para solicitar feedback en reuniones de grupos de discusión sobre proposición de nuevas características.

- **Diseño de interiores, muebles, calzado...** Una comunicación clara entre diseñadores y fabricantes durante el proceso de diseño es crucial ya que es imprescindible que haya consenso antes de invertir en recursos valiosos. Además es fundamental reducir el tiempo del ciclo de diseño para llegar al mercado antes que la competencia y con nuevas ideas.

- **Modelado para medicina.** La capacidad de usar modelos para planificación prequirúrgica reduce tiempo de quirófano, abarata los costes y permite ensayos de procedimiento. Además los modelos mejoran la capacidad del médico de comunicarse con sus pacientes lo que aumenta la confianza de éstos en el éxito de la operación.

12.6 Ventajas generales del prototipado

Las ventajas que ofrece la utilización sistemática de esta tecnología dentro del proceso global del lanzamiento de un nuevo producto y/o en el de modificación y/o mejora de productos ya existentes abarca a casi todos los departamentos que, directa o indirectamente, están involucrados en él. Se destacarán las siguientes ventajas:

- Disponer de una herramienta de comunicación física que no ofrece ningún tipo de duda no permitiendo en consecuencia interpretaciones distintas y/o erróneas.
- Permite realizar determinadas pruebas funcionales de montajes e interferencias.

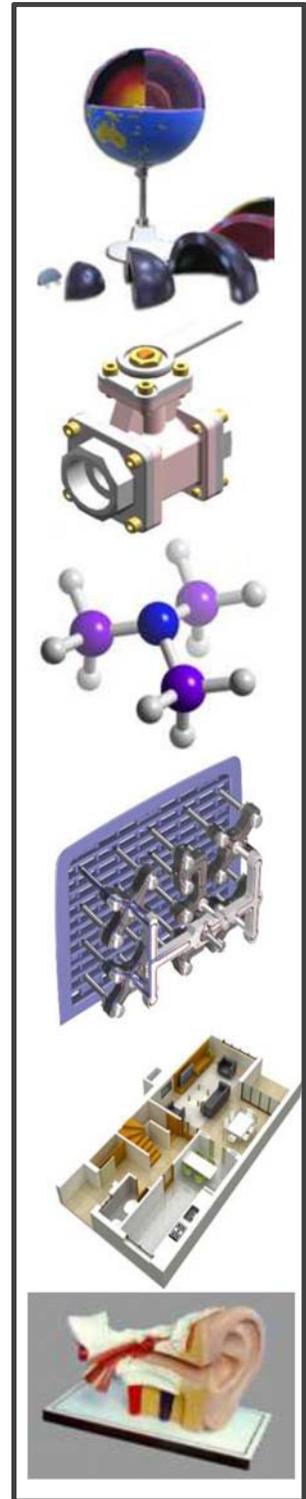


Fig.12.14.
Aplicaciones del PR.

Grupo Diseño, Gestión y Desarrollo de Nuevos Productos

- Facilita extraordinariamente la relación entre clientes y proveedores. Facilita, y en muchos casos estimula, la aportación de mejoras ya sea en el diseño y su funcionalidad, ya sea en el proceso productivo.
- Dado que permite visualizar la pieza se detectan en las primeras etapas de diseño los posibles errores estéticos, de concepto o de funcionalidad. Además se evitan incorrectas interpretaciones de los planos.
- Comercialización, estudios de mercado: la compañía puede saber cuál será la acogida del producto por parte de los clientes antes de realizar una fuerte inversión.
- Mejora de los procesos de fabricación, dado que permite planificar los utillajes y los procesos de fabricación, así como ayudar a establecer analogías entre la forma de creación del modelo y el proceso de fabricación real para introducir mejoras en éste.

12.7 Limitaciones del PR

La principal limitación es que los materiales con los que se realizan los prototipos tienen unas características mecánicas que en ocasiones distan mucho de las de las piezas reales. Así es frecuente que las propiedades mecánicas y las temperaturas máximas sean limitadas y los modelos relativamente frágiles. Otras restricciones importantes son:

- El tamaño de las piezas a fabricar suele ser reducido.
- Los materiales son caros.
- El ritmo de producción es relativamente lento.

Finalmente cabe comentar que el proceso de intercambio de la información de la geometría de la pieza desde el programa CAD al fichero neutro STL de la máquina de prototipado rápido suele ser problemático. En este proceso, consistente en el fraccionamiento de la pieza en secciones planas (slicing) definidas por un conjunto de triángulos, es frecuente la aparición de errores.

CAPITULO XIII

Ingeniería Inversa



13. INGENIERÍA INVERSA

13.1 Introducción a la Ingeniería Inversa

El objetivo de la **ingeniería inversa** es obtener información o un diseño a partir de un producto accesible al público con el fin de determinar de qué está hecho, qué lo hace funcionar y cómo fue fabricado.

Hoy en día (principios del siglo XXI) los productos más comúnmente sometidos a ingeniería inversa son los programas de computadoras y los componentes electrónicos pero, en realidad, cualquier producto puede ser objeto de un análisis de este tipo.

El método se denomina así porque avanza en dirección opuesta a las tareas habituales de ingeniería que consisten en utilizar datos técnicos para elaborar un producto determinado.



Fig.13.1. Fases de la ingeniería Inversa.

La ingeniería inversa de un componente mecánico requiere un modelo digital preciso de los objetos a ser reproducidos. Antes que un conjunto de puntos un modelo digital preciso es representado típicamente por un conjunto de superficies tal como triangulares planas, un conjunto de la planicie o superficies curvas de NURBS, o idealmente para componentes mecánicos un sólido de CAD que se compone de un subconjunto de CAD de superficies de NURBS.

Un escáner 3D se puede usar para digitalizar forma libre o componentes formados gradualmente cambiantes de geometrías así como también prismáticas mientras que una CMM es usada generalmente sólo para que determine las dimensiones sencillas de un modelo sumamente prismático. Estos puntos de datos entonces se procesan para crear un usable modelo digital.

13.2 Escaner 3D

Un **escáner 3D** es un dispositivo que analiza un objeto o una escena para reunir datos de su forma y ocasionalmente su color. La información obtenida se puede usar para construir modelos digitales tridimensionales que se utilizan en una amplia variedad de aplicaciones. Desarrollados inicialmente en aplicaciones industriales (metrología, automóvil) han encontrado un vasto campo de aplicación en actividades como la arqueología, arquitectura, ingeniería, y entretenimiento (en la producción de películas y videojuegos).



Fig.13.2. Escaneo 3D.

El propósito de un escáner 3D es, generalmente, el de crear una nube de puntos a partir de muestras geométricas en la superficie del objeto. Estos puntos se pueden usar entonces para extrapolar la forma del objeto (un proceso llamado reconstrucción). Si la información de color se incluye en cada uno de los puntos entonces los colores en la superficie del objeto se pueden determinar también.

Los escáneres 3D son distintos a las cámaras. Al igual que éstas tienen un campo de visión en forma de cono, pero mientras una cámara reúne información de color acerca de las superficies dentro de su campo de visión, los escáneres 3D reúnen información acerca de su geometría. El modelo obtenido con este equipo describe la posición en el espacio tridimensional de cada punto analizado.

Si se define un sistema esférico de coordenadas y se considera que el origen es el escáner, cada punto analizado se asocia con una coordenada ϕ y θ y con una distancia que corresponde al componente r . Estas coordenadas esféricas describen completamente la posición tridimensional de cada punto en el modelo en un sistema de coordenadas local relativo al escáner.

Para la mayoría de las situaciones un sólo escaneo no producirá un modelo completo del objeto. Generalmente se requieren múltiples tomas, incluso centenares, desde muchas direcciones diferentes para obtener información de todos los lados del objeto. Estos escaneos tienen que ser integrados en un sistema común de referencia mediante un proceso que se llama generalmente alineación y que transforma las coordenadas locales de cada toma en coordenadas generales del modelo. El proceso completo que va de las tomas individuales a un modelo completo unificado define el flujo de captura de modelo 3D.

Las nubes de puntos producidas por los escáneres 3D pueden ser utilizadas directamente para la medición y la visualización en el mundo de la arquitectura y la construcción. No obstante la mayoría de las aplicaciones utilizan modelos 3D poligonales, modelos de superficies NURBS, o modelos CAD basados en las características (modelos sólidos).

13.2.1 Modelos de malla de polígonos

En una representación poligonal de una forma una superficie curva es modelada como muchas pequeñas superficies planas (al igual que una esfera es modelada como una bola de discoteca). El proceso de convertir una nube de puntos en un modelo poligonal 3D se llama reconstrucción. La reconstrucción de modelos poligonales implica encontrar y conectar los puntos adyacentes mediante líneas rectas con el fin de crear una superficie continua.

Los modelos poligonales, también llamados modelos de malla, son útiles para la visualización o para algunas aplicaciones CAM pero son, en general, "pesados" (archivos de datos muy grandes) y son relativamente difíciles de editar en este formato.

Existen muchas aplicaciones, tanto libres como propietarias, destinadas a este fin: MeshLab, cyclone, kubit PointCloud para AutoCAD, JRC 3D Reconstructor, PhotoModeler, ImageModel, PolyWorks, Rapidform, Geomagic, ImageWare, Rhino, etc.

13.2.2 Modelos de superficies

El siguiente nivel de sofisticación en la modelización implica el uso de un conjunto de pequeñas superficies curvas que unidas entre sí modelan nuestra forma. Éstas pueden ser NURBS, T-Splines u otras representaciones de curvas. Utilizando NURBS nuestra esfera es una esfera matemática verdadera.

También tienen la ventaja de ser más ligeras y más fácilmente manipulables cuando se exportan a CAD. Los modelos de superficie son algo más modificables, pero sólo en un sentido escultórico de empujar y tirar para deformar la superficie. Esta representación se presta bien al modelado de formas orgánicas o artísticas.

Algunas aplicaciones sólo ofrecen un diseño manual de las curvas pero las más avanzadas ofrecen tanto manual como automático. Aplicaciones usadas para este modelado son: Rapidform, Geomagic, Rhino, Maya, T Splines, etc.

13.2.3 Modelos sólidos CAD

Desde el punto de vista de la ingeniería y la fabricación la representación fundamental de una forma digitalizada es el modelo CAD, totalmente editable. Después de todo el CAD es el "lenguaje común" de la industria para describir, editar y producir la forma de los bienes de una empresa. En CAD nuestra esfera está descrita por parámetros que son fácilmente editables mediante el cambio de un valor (por ejemplo, el centro de la esfera o su radio).

Estos modelos CAD no describen simplemente el envoltorio o la forma del objeto sino que también incorporan la "intención del diseño" (es decir, las características fundamentales y su relación con otras funciones). Un ejemplo de la intención del diseño más allá de la forma por sí sola podrían ser los tornillos de un freno de tambor que deben ser concéntricos con el agujero en el centro. Este saber podría guiar la secuencia y el método de creación del modelo CAD: Un diseñador con el conocimiento de esta relación no desarrollaría los tornillos referenciados al diámetro exterior sino que lo haría depender del centro del tambor. Por tanto un diseñador creando un modelo CAD incluirá tanto la forma como la finalidad del mismo en el modelo completo.

Distintos enfoques se ofrecen para llegar al modelo CAD. Algunos exportan las superficies NURBS tal cual y dejan que sea el diseñador el que complete el modelo en CAD (por ejemplo, Geomagic, ImageWare, Rhino). Otros utilizan el análisis de los datos para crear un modelo editable basado en las características que se importa en CAD con el árbol de características intacto produciendo un modelo completo y nativo de CAD recogiendo tanto la forma como la finalidad del diseño (Geomagic, Rapidform), mientras que otras

Grupo Diseño, Gestión y Desarrollo de Nuevos Productos

aplicaciones son lo suficientemente robustas como para manipular modelos de un número limitado de puntos o polígonos dentro del entorno CAD (por ejemplo, Catia).

ANEXO A: Estructura de Costos aplicada al sistema productivo

A continuación desarrollaremos una estructura de costos aplicable al sistema productivo teniendo en cuenta costos fijos y variables (función del tiempo y material) la cual podría utilizarse, por ejemplo, para la producción mensual.

$$C_T = CF + CV$$

$$C_T = CF + \sum C_{mi} * u_p + C_h * t_{np} + C_h * t_{op} + C_{Tm} + \sum C_{Hj} * \frac{t_{mecj}}{T}$$

- C_T = Costo Total
- CF = Costos Fijos
- CV = Costos Variables en función de los materiales y tiempo.
- C_{mi} = Costo del material "i"
- u_p = unidades producidas
- C_h = Costo horario
- t_{np} = tiempo no productivo
- t_{op} = tiempo de operación
- C_{Tm} = Coste total de mantenimiento de herramental utilizado
- C_{Hi} = Costo de la/s herramienta/s usadas en el proceso
- t_{meci} = tiempo de mecanizado
- T = vida útil del herramental

Los CF están estructurados por alquileres, sueldos, servicios, etc.

El término $\sum C_{mi} * u_p$ determina el costo generado por la utilización de las distintas materias primas "i" necesarias para el producto en función la cantidad de unidades producidas.

Por otra parte, $C_h * t_{np} + C_h * t_{op}$ cuantifica los costos que surgen del tiempo no productivo (descansos, tiempo entre procesos, etc.) y el de operación a partir del coste horario (hora hombre y hora máquina).

Por último, los costos originados por la/s herramienta/s utilizadas estarán representados por la expresión $C_{man} + \sum C_{Hj} * \frac{t_{meci}}{T}$, en la cual se refleja el costo total de mantenimiento de la/s herramienta/s "j" aplicadas al proceso más la amortización dada por la relación entre el tiempo de mecanizado y el de vida útil.

ANEXO B: Ejemplos de Ecodiseño

1) Vaso plástico – Pieza simple

El siguiente ejemplo de diseño sustentable está basado en el diseño de un vaso plástico y el estudio de los impactos ambientales que generaría su fabricación a través de SolidWorks Sustainability. Para realizar el análisis del impacto que generaría su manufactura es necesario seguir una serie de pasos.

Lo primero que se debe hacer es abrir la pieza en el soporte CAD (SolidWorks en este caso) para verificar que todas las características geométricas (forma, medidas y apariencia) sean las adecuadas.

Luego, con las herramientas del Sustainability, empezaremos el análisis del producto diseñado. El primer dato que debemos completar es el material con el que se fabricará la pieza lo cual permitirá calcular ciertas características como el peso o cantidad de material.

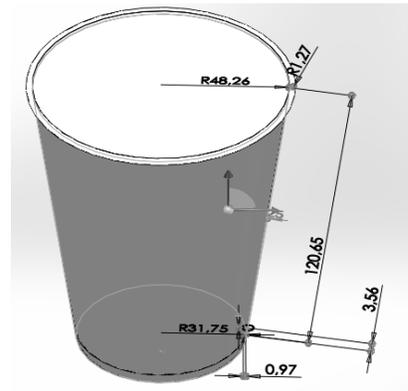


Fig.B1. Ejemplo de Ecodiseño.

En el ejemplo el material elegido es PET (tereftalato de polietileno) dentro de la clase “plásticos”.

A continuación hay que insertar datos acerca del proceso de fabricación de la pieza. En este paso se detallan el tipo de proceso con el que se la obtiene y el lugar de fabricación y explotación comercial. En este caso se trata de moldeo por inyección realizado en Asia con el posterior transporte a USA para su comercialización.



Fig.B2. Datos de fabricación.

A partir de los datos introducidos Sustainability proporcionará algunos cálculos del impacto medioambiental.

Según los cálculos, un solo vaso es responsable de generar:

- 60 gramos de gases de efecto invernadero equivalentes en carbono.
- 1,33 MJ de energías no renovables consumidas a lo largo del ciclo de vida (¡muchísimo para un vaso tan pequeño!).

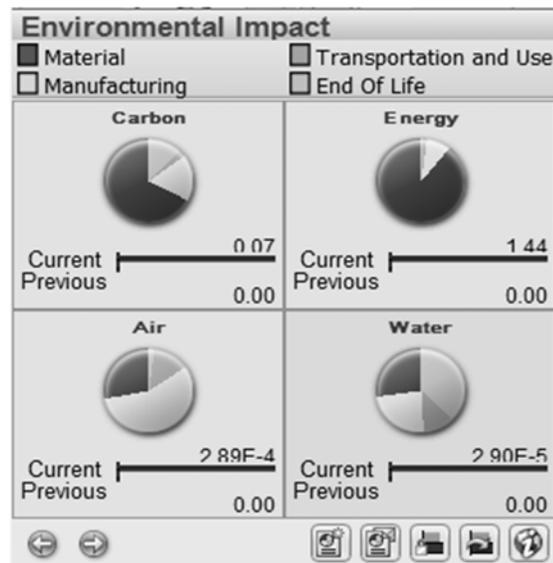


Fig.B3. Cálculo de impacto ambiental.

Grupo Diseño, Gestión y Desarrollo de Nuevos Productos

- $2,67e-4$ kg eq. de SO_2 de acidificación del aire.
- $2,68e-5$ kg eq. de PO_4 de eutrofización del agua.

La única medición que me dice algo en sentido absoluto es la demanda de energía por lo que podemos establecerla como punto de partida para poder jugar con distintos diseños y compararlos.

A continuación veremos los cambios generados en las distintas variables al rediseñar alguno de los aspectos de la pieza a fabricar:

✓ **Lugar de fabricación.** Una primera característica a tener en cuenta es el lugar de fabricación teniendo en cuenta distintos factores técnico-económicos que afectan a la producción. Por ello, al cambiar el lugar de fabricación de Asia a Norte América, los resultados obtenidos fueron:

A partir de los cálculos realizados se puede determinar que, para el caso estudiado, no conviene

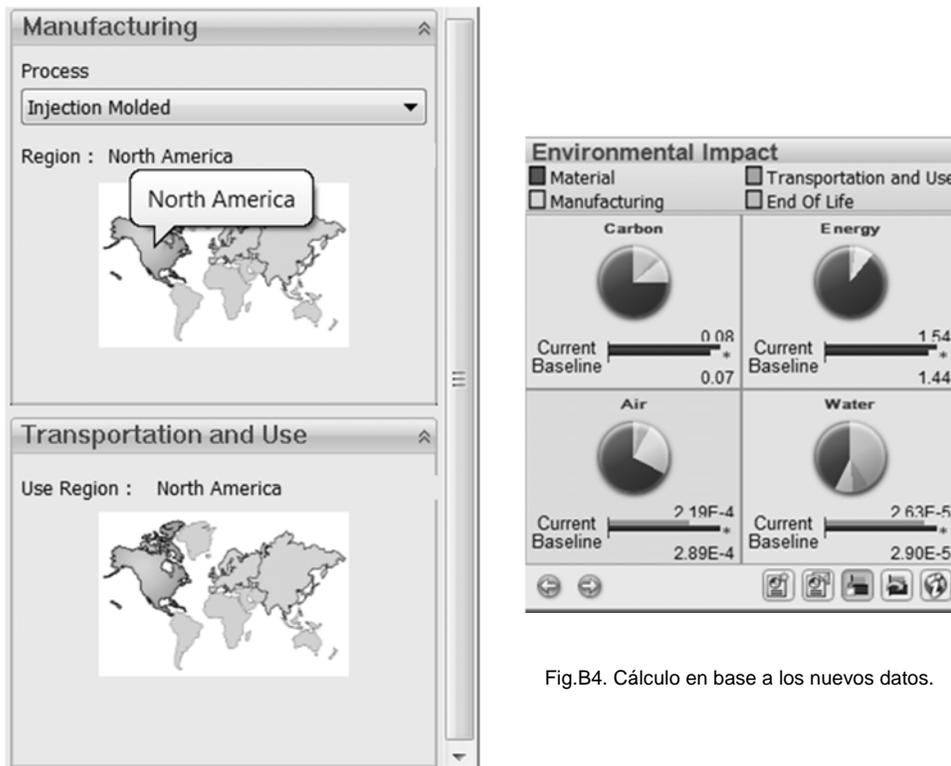


Fig.B4. Cálculo en base a los nuevos datos.

fabricar el producto en Norte América porque, si bien parece ser mejor en los impactos sobre el aire y agua, es peor en la demanda de carbono y energía. Esto puede deberse a que el transporte de los vasos en camión por América del Norte tiene mayores impactos por milla que enviarlos desde Asia.

✓ **Material que se utiliza.** En el caso analizado trataremos de sustituir al PET por un polímero más ligero que permita reducir el peso de transporte pero que soporte una fuerza mínima que evite que el producto se rompa durante su embalaje y transporte. Para reflejar las características que necesitamos podemos cargarlas al sistema y filtrar los materiales que no cumplan con los requisitos mínimos.

Dentro de las opciones elegimos el PS HI (poliestireno de alta resistencia al impacto). Al visualizar los

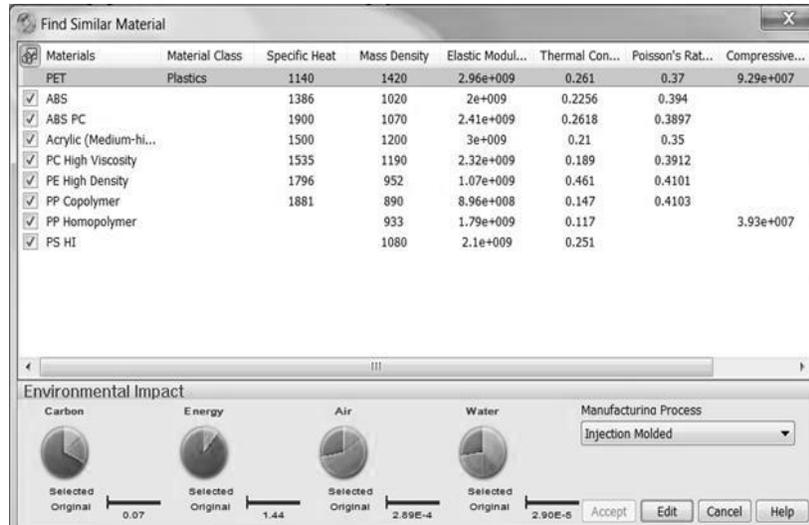


Fig.B5. Cambios de material.

resultados del impacto ambiental podemos ver barras verdes en los aspectos que analizamos. Es decir, para el producto que queremos obtener en esta ocasión y con el diseño especificado, el PS HI resulta un material más ecológico que el PET.

✓ **Rediseñar la geometría del vaso.** Otra opción posible a la hora de realizar mejoras en el diseño es cambia las dimensiones del elemento a realizar. Probando con algunas geometrías llegamos a la conclusión que generando un vaso de radio inferior de 36,9 mm, un radio superior de 63,5 mm y una altura de 76,2 mm tendría el mismo volumen.

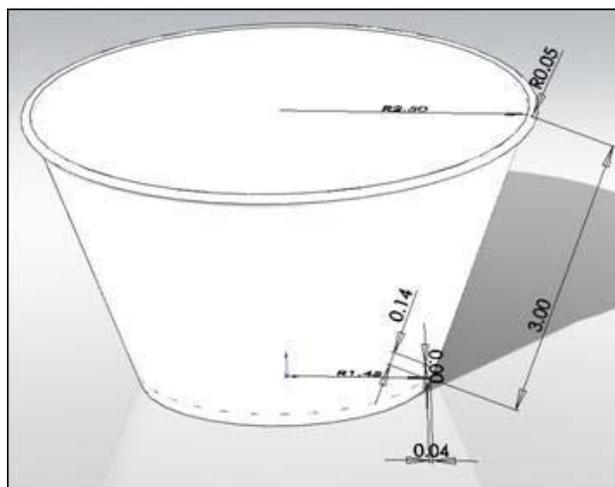


Fig.B6. Nuevo diseño.

Grupo Diseño, Gestión y Desarrollo de Nuevos Productos

Al hacer los cálculos podemos evidenciar que se cubrió todo de barras verdes: 0,04 kg eq. de CO₂, 0,99 MJ de energía, 2,12e 4 kg de SO₂ de impacto del aire y 2,24e 5 kg eq. de PO₄ de impacto del agua.

Una vez realizados los cálculos definitivos y definido el modelo final podemos introducir las

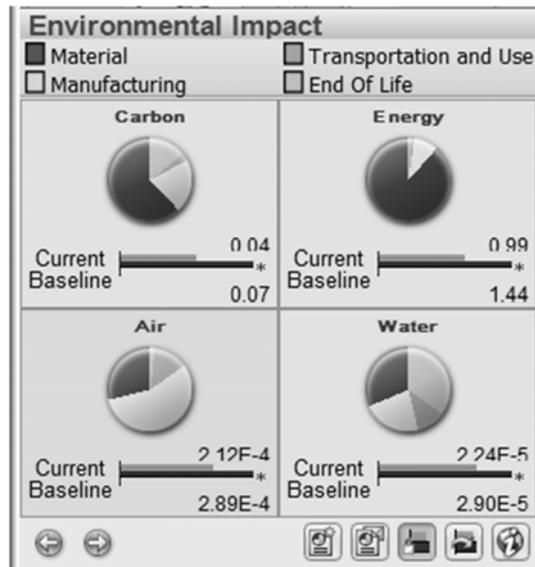


Fig.B7. Nuevo cálculo del impacto ambiental.

cantidades a producir y visualizar las diferencias entre el modelo final y el original.

II) Juguete a baterías – Ensamblaje de Piezas

En este ejemplo estudiaremos el caso de un juguete a baterías constituido por distintas piezas ensambladas.



Fig.B9. Camión de bomberos – Ejemplo 2.

Primero revisamos cada una de las piezas y nos aseguramos que los parámetros —materiales y ubicaciones— estuvieran correctamente ajustados para cada una de ellas.

A continuación desde Sustainability en el nivel de ensamblaje veremos opciones nuevas disponibles:

Manufacturing

Region : Asia

Transportation and Use

Primary Mode of

Use Region : North America

Product Lifetime Energy
Type of energy:
None

Fig.B10 .Datos de manufactura.

Por un lado, en el proceso de fabricación, tendremos la región de fabricación específica donde se ensambla el producto y, a su vez, zonas donde se fabrican las piezas componentes del ensamblaje. Por ello tendremos dos transportes: el primero desde las zonas de fabricación hacia la de ensamblaje y el segundo de la zona de ensamblaje a la de uso. Aquí podemos especificar el modo principal de transporte de este segundo nivel. Del mismo modo que en el caso del vaso el juguete se ensambla en Asia aunque no todas las piezas se fabriquen allí, como hemos comentado anteriormente, y se utiliza en América del Norte, enviándose por mar.

¿Qué es el recuadro de energía? Es donde podemos establecer la cantidad de energía que utiliza el producto. Se especifica en términos del tipo de energía consumida durante la vida útil del producto — gasolina, diésel, electricidad, etc.

Para el caso del juguete suponemos que la batería AA del mismo se recargaría diez veces. Una batería AA tiene una capacidad de 2500 miliamperios/hora (mAh) en tan sólo un voltio, lo que equivaldría a unos 3 vatios/hora (Wh) por batería. Diez recargas de batería serían 30 Wh o 0,03 kWh durante la vida útil del juguete.

Product Lifetime Energy
Type of energy:
Electricity

Amount:
0.03 kWh

Fig.B11. Energía consumida por el producto.

Grupo Diseño, Gestión y Desarrollo de Nuevos Productos

Finalmente especificamos el modelo de partida según las características y parámetros establecidos y analizamos los resultados:

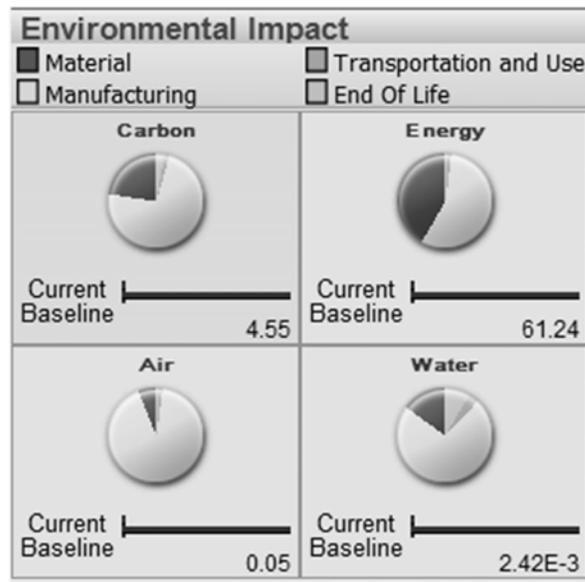


Fig.B12. Cálculo del impacto medioambiental generado por el diseño.

Los materiales y el proceso de fabricación asociado con esos materiales constituyen la mayor parte del total de los impactos.

Para analizar el grado de impacto que cada uno de los componentes del ensamblaje aporta al total Sustainability presenta la herramienta Assembly Visualization en la cual podemos visualizar, por ejemplo, la huella de carbono que cada componente aporta.

De esta manera se puede establecer claramente las piezas que tienen un mayor impacto en el modelo. Las ruedas y el cubo son las piezas principales en las que deberíamos centrarnos al rediseñar el juguete.

The screenshot shows the 'Assembly Visualization' tool interface. It features a table with columns for 'File Name', 'Quantity', and 'Sustainability-Total Carbon'. The table lists various components and their respective carbon footprints.

File Name	Quantity	Sustainability-Total Carbon
Rear_Wheel	4	0.82
Hub1	4	0.71
Top main shell	1	0.42
Chassis	1	0.41
Battery_PlateA(Minus)	2	0.33
Rear_Axle	2	0.32
Transmission Casing	1	0.24
fireman	1	0.19
Battery_Cover	1	0.17
Knob1	1	0.17
Battery_Plate	1	0.16

Fig.B13. Impacto generado por cada componente.

ANEXO C: Ejemplos de CAM***I) Torneado de una pieza cilíndrica – Programa de CN***

En el siguiente ejemplo veremos cómo realizar el programa para generar un torneado en un CNC tomando como punto de referencia el punto mostrado en la figura:

Programación con el centro del arco:

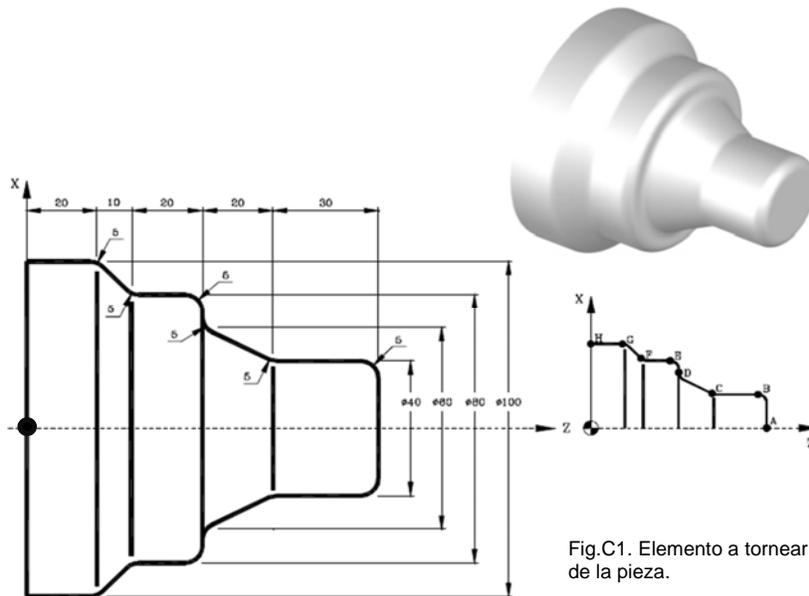


Fig.C1. Elemento a tornear y cotas de la pieza.

- **G90 G95 G96 F0.15 S180 T2 D1 M4**
- **G0 X120 Z120**
- **G42 X0** [Comienzo de la compensación de radio]
- **G01 X0 Z100**
- **G37 I4** [Entrada tangencial en el punto A]
- **G01 X40** [Tramo A-B]
- **G36 I5** [Redondeo B]
- **G01 Z70** [Tramo B-C]
- **G36** [Redondeo C (El radio I permanece activo)]
- **G01 X60 Z50** [Tramo C-D]
- **G36** [Redondeo D]
- **G01 X80** [Tramo D-E]
- **G36** [Redondeo E]
- **G01 Z30** [Tramo E-F]
- **G36** [Redondeo F]
- **G01 X100 Z20** [Tramo F-G]
- **G36** [Redondeo G]
- **G01 Z0** [Tramo G-H]
- **G38 I4** [Salida tangencial]
- **G0 X120**
- **G40 Z120** [Fin de la compensación de radio]
- **M30**

II) Fresado – Programación del CNC

Grupo Diseño, Gestión y Desarrollo de Nuevos Productos

En este caso presentamos el programa necesario para realizar un fresado con la forma indicada en la imagen que se muestra a continuación:

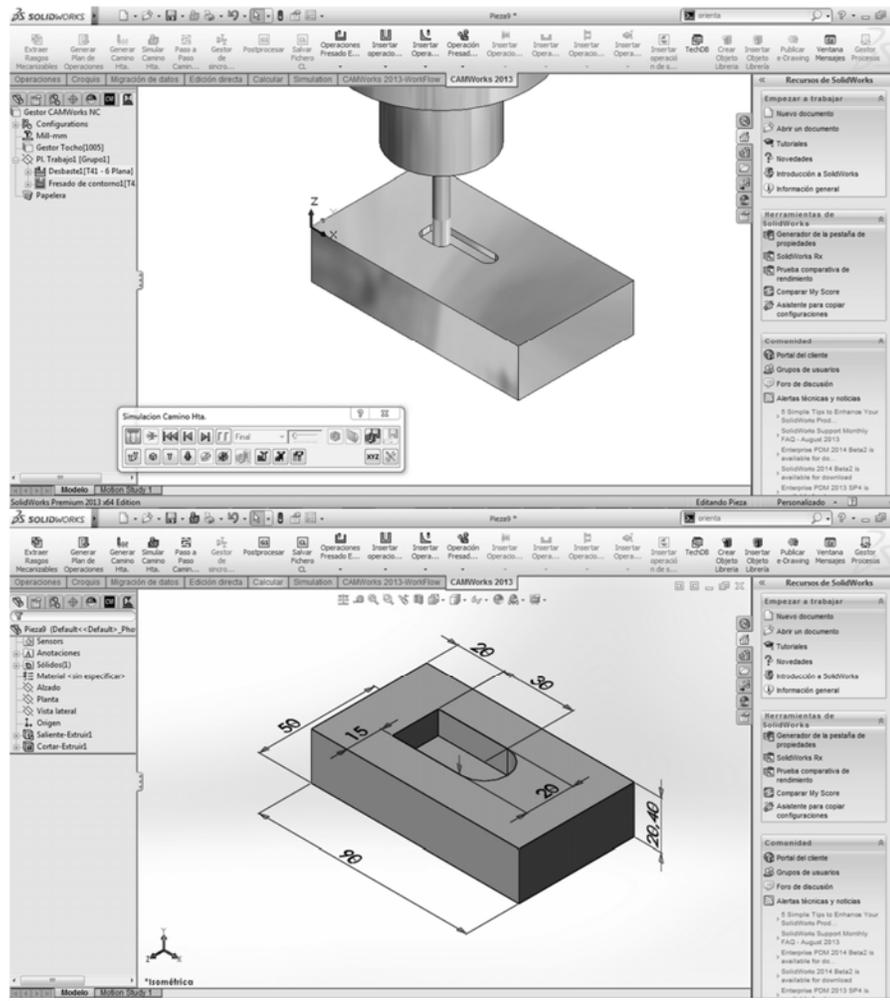


Fig.C2. Contorno a fresar.

Programa para realizar el fresado en el CN.

- O0001
- N1 G21
- N2 (6mm HSS 2FL 12 LOC)
- N3 G91 G28 X0 Y0 Z0
- N4 T41 M06
- N5 S200 M03
- N6 (Desbaste1)
- N7 G90 G54 G00 X50. Y26.95
- N8 G43 Z10. H41 M08
- N9 G01 Z-2.4 F62.5
- N10 G17 X28.05 F500.
- N11 Y23.05
- N12 X50.
- N13 G03 Y26.95 I0 J1.95
- N14 G01 Y29.35

- N15 X25.65
- N16 Y20.65
- N17 X50.
- N18 G03 Y29.35 I0 J4.35
- N19 G01 Y31.75
- N20 X23.25
- N21 Y18.25
- N22 X50.
- N23 G03 Y31.75 I0 J6.75
- N24 G01 X23.25
- N25 Y18.25
- N26 X50.
- N27 G03 Y31.75 I0 J6.75
- N28 G00 Z10.
- N29 Y26.95
- N30 Z7.6
- N31 G01 Z-4.3 F62.5
- N32 X28.05 F500.
- N33 Y23.05
- N34 X50.
- N35 G03 Y26.95 I0 J1.95
- N36 G01 Y29.35
- N37 X25.65
- N38 Y20.65
- N39 X50.
- N40 G03 Y29.35 I0 J4.35
- N41 G01 Y31.75
- N42 X23.25
- N43 Y18.25
- N44 X50.
- N45 G03 Y31.75 I0 J6.75
- N46 G01 X23.25
- N47 Y18.25
- N48 X50.
- N49 G03 Y31.75 I0 J6.75
- N50 G00 Z10.
- N51 Y26.95
- N52 Z5.7
- N53 G01 Z-6.2 F62.5
- N54 X28.05 F500.
- N55 Y23.05
- N56 X50.
- N57 G03 Y26.95 I0 J1.95
- N58 G01 Y29.35
- N59 X25.65
- N60 Y20.65

Grupo Diseño, Gestión y Desarrollo de Nuevos Productos

- N61 X50.
- N62 G03 Y29.35 IO J4.35
- N63 G01 Y31.75
- N64 X23.25
- N65 Y18.25
- N66 X50.
- N67 G03 Y31.75 IO J6.75
- N68 G01 X23.25
- N69 Y18.25
- N70 X50.
- N71 G03 Y31.75 IO J6.75
- N72 G00 Z10.
- N73 Y26.95
- N74 Z3.8
- N75 G01 Z-8.1 F62.5
- N76 X28.05 F500.
- N77 Y23.05
- N78 X50.
- N79 G03 Y26.95 IO J1.95
- N80 G01 Y29.35
- N81 X25.65
- N82 Y20.65
- N83 X50.
- N84 G03 Y29.35 IO J4.35
- N85 G01 Y31.75
- N86 X23.25
- N87 Y18.25
- N88 X50.
- N89 G03 Y31.75 IO J6.75
- N90 G01 X23.25
- N91 Y18.25
- N92 X50.
- N93 G03 Y31.75 IO J6.75
- N94 G00 Z10.
- N95 Y26.95
- N96 Z1.9
- N97 G01 Z-10. F62.5
- N98 X28.05 F500.
- N99 Y23.05
- N100 X50.
- N101 G03 Y26.95 IO J1.95
- N102 G01 Y29.35
- N103 X25.65
- N104 Y20.65
- N105 X50.
- N106 G03 Y29.35 IO J4.35

- N107 G01 Y31.75
- N108 X23.25
- N109 Y18.25
- N110 X50.
- N111 G03 Y31.75 I0 J6.75
- N112 G01 X23.25
- N113 Y18.25
- N114 X50.
- N115 G03 Y31.75 I0 J6.75
- N116 G00 Z10.
- N117 Z50. M09
- N118 G91 G28 Z0
- N119 (4mm HSS 2FL 8 LOC)
- N120 T42 M06
- N121 S200 M03

- N122 (Fresado de contorno1)
- N123 G90 G54 G41 D62 G00 X35. Y17.
- N124 G43 Z5. H42 M08
- N125 G01 Z-1.6 F62.5
- N126 X50. F500.
- N127 G03 Y33. I0 J8.
- N128 G01 X22.
- N129 Y17.
- N130 X35.
- N131 G00 Z5.
- N132 Z3.4
- N133 G01 Z-3.2 F62.5
- N134 X50. F500.
- N135 G03 Y33. I0 J8.
- N136 G01 X22.
- N137 Y17.
- N138 X35.
- N139 G00 Z5.
- N140 Z1.8
- N141 G01 Z-4.8 F62.5
- N142 X50. F500.
- N143 G03 Y33. I0 J8.
- N144 G01 X22.
- N145 Y17.
- N146 X35.
- N147 G00 Z5.
- N148 Z.2
- N149 G01 Z-6.4 F62.5
- N150 X50. F500.
- N151 G03 Y33. I0 J8.

Grupo Diseño, Gestión y Desarrollo de Nuevos Productos

- N152 G01 X22.
- N153 Y17.
- N154 X35.
- N155 G00 Z5.
- N156 Z-1.4
- N157 G01 Z-8. F62.5
- N158 X50. F500.
- N159 G03 Y33. IO J8.
- N160 G01 X22.
- N161 Y17.
- N162 X35.
- N163 G00 Z5.
- N164 Z-3.
- N165 G01 Z-9.6 F62.5
- N166 X50. F500.
- N167 G03 Y33. IO J8.
- N168 G01 X22.
- N169 Y17.
- N170 X35.
- N171 G00 Z5.
- N172 Z-4.6
- N173 G01 Z-10. F62.5
- N174 X50. F500.
- N175 G03 Y33. IO J8.
- N176 G01 X22.
- N177 Y17.
- N178 X35.
- N179 G00 Z5.
- N180 Z50. M09
- N181 G40 X35. Y17.
- N182 G91 G28 Z0
- N183 G28 X0 Y0
- N184 M30

En algunos sistemas CAM podemos obtener las trayectorias que deben seguir las herramientas junto con los datos de las operaciones, herramientas utilizadas, materiales, características técnicas, etc., dependiendo del programa cargado en el CNC.

Operation	Desbaste1	
Operation Desc	Rough Mill	
Speed (RPM)	200.00	
Feed	500.00	
Z Feed Rate	62.50	
Bottom Allowance	0.00	
Side Allowance	0.25	
Tool Protrusion Length	N.A.	
Tool Station no.	41	
Tool Description	6mm HSS 2FL 12 LOC	
Holder Description		
Holder Number	Default	
Absolute Incremental	Absolute	
Coolant	Flood	
Mach Depth	10.00	
	Minimum	Maximum
X:	23.25	56.75
Y:	18.25	31.75
Z:	-10.00	50.00
Tip Len	1792.22	
Time (MIN)	4.03	

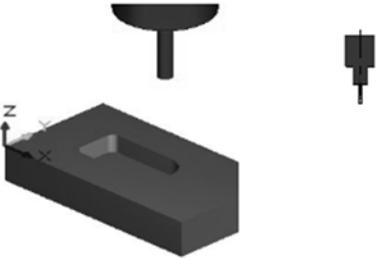


Fig.C3. Herramienta de desbaste.

Operation	Fresado de contorno1	
Operation Desc	Contour Mill	
Speed (RPM)	200.00	
Feed	500.00	
Z Feed Rate	62.50	
Lead in Type	Ninguno	
Side Allowance	0.00	
Tool Protrusion Length	N.A.	
Tool Station no.	42	
Tool Description	4mm HSS 2FL 8 LOC	
Holder Description		
Holder Number	Default	
Display Tool Offset	Yes	
Absolute Incremental	Absolute	
Coolant	Flood	
Mach Depth	10.00	
	Minimum	Maximum
X:	22.00	58.00
Y:	17.00	33.00
Z:	-10.00	50.00
Tip Len	927.13	
Time (MIN)	2.09	

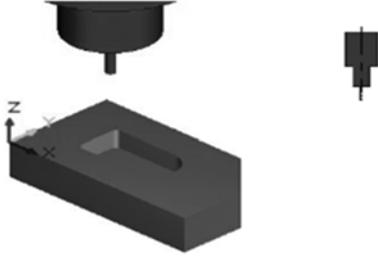


Fig.C4. Fresado.

ANEXO D: Enfoque matemático del Método de los Elementos Finitos

D.1 Introducción

D.1.1 Sistemas discretos y sistemas continuos

Al efectuar una clasificación de las estructuras suelen dividirse en discretas o reticulares y continuas. Las primeras son aquéllas que están formadas por un ensamblaje de elementos claramente diferenciados unos de otros y unidos en una serie de puntos concretos de tal manera que el sistema total tiene forma de malla o retícula. La característica fundamental de las estructuras discretas es que su deformación puede definirse de manera exacta mediante un número finito de parámetros, como por ejemplo las deformaciones de los puntos de unión de unos elementos y otros. De esta manera el equilibrio de toda la estructura puede representarse mediante las ecuaciones de equilibrio en las direcciones de dichas deformaciones.

Las estructuras continuas son muy frecuentes en ingeniería, como por ejemplo: bastidores de máquinas, carrocerías de vehículos, losas de cimentación de edificios, vasijas de reactores, elementos de

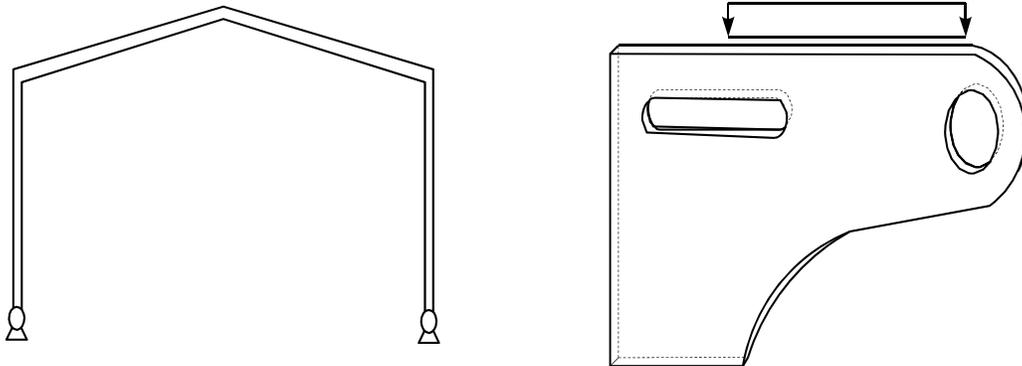


Fig.D1. Estructura reticular discreta y estructura continua.

máquinas (bielas, poleas, carcasas...), y para su análisis es necesario disponer de un método que tenga en cuenta su naturaleza continua.

Hasta la llegada del Método de los Elementos Finitos (MEF) los sistemas continuos se abordaban analíticamente, pero por esa vía sólo es posible obtener solución para sistemas con geometría muy sencilla y/o condiciones de contorno simples. También se han utilizado técnicas de diferencias finitas pero éstas plantean problemas cuando los contornos son complicados.

D.1.2 Hipótesis de discretización

En una estructura discreta su deformación viene definida por un número finito de parámetros (deformaciones y/o giros) que juntos conforman el vector de deformaciones Δ , y la estructura tiene tantas formas de deformarse como términos tenga dicho vector. Un medio continuo tiene infinitas formas posibles de deformarse, independientes unas de otras, ya que cada punto puede desplazarse manteniendo fijos cualquier número finito de los puntos restantes, por grande que sea este último. Por lo tanto la configuración deformada de la estructura no puede venir dada por un vector finito Δ como el anterior sino que es una función vectorial u que indica cuáles son las deformaciones de cualquier punto y que tiene tres componentes escalares:

$$\mathbf{u} = \begin{cases} u(x, y, z) \\ v(x, y, z) \\ w(x, y, z) \end{cases}$$

Esta función es la solución de la ecuación diferencial que gobierna el problema y, si éste está bien planteado, cumplirá las condiciones de contorno impuestas, pero en principio no puede asegurarse que esta función \mathbf{u} tenga una expresión analítica manejable, ni siquiera que pueda calcularse. Por lo tanto la función \mathbf{u} no podrá conocerse en general.

Para resolver este problema el Método de los Elementos Finitos recurre a la hipótesis de discretización que se basa en lo siguiente:

- El continuo se divide por medio de líneas o superficies imaginarias en una serie de regiones contiguas y disjuntas entre sí, de formas geométricas sencillas y normalizadas, llamadas elementos finitos.
- Los elementos finitos se unen entre sí en un número finito de puntos llamados nudos.
- Los desplazamientos de los nudos son las incógnitas básicas del problema y éstos determinan unívocamente la configuración deformada de la estructura. Sólo estos desplazamientos nodales se consideran independientes.
- El desplazamiento de un punto cualquiera viene unívocamente determinado por los desplazamientos de los nudos del elemento al que pertenece. Para ello se definen, para cada elemento, unas funciones de interpolación que permiten calcular el valor de cualquier desplazamiento interior por interpolación de los desplazamientos nodales. Éstas serán de tal naturaleza que se garantice la compatibilidad de deformaciones necesaria en los contornos de unión entre los elementos.
- Las funciones de interpolación y los desplazamientos nodales definen unívocamente el estado de deformaciones unitarias en el interior del elemento. Éstas, mediante las ecuaciones constitutivas del material, definen el estado de tensiones en el elemento y por supuesto en sus bordes.
- Para cada elemento existe un sistema de fuerzas concentradas en los nudos que equilibran a las tensiones existentes en el contorno del elemento y a las fuerzas exteriores sobre él actuantes.

Los dos aspectos más importantes de esta hipótesis, sobre los que hay que hacer hincapié, son:

- La función solución del problema \mathbf{u} es aproximada de forma independiente en cada elemento. Para una estructura discretizada en varios elementos pueden utilizarse funciones de interpolación distintas para cada uno de ellos, a juicio del analista, aunque deben cumplirse ciertas condiciones de compatibilidad en las fronteras entre los elementos.
- La función solución es aproximada dentro de cada elemento, apoyándose en un número finito (y pequeño) de parámetros, que son los valores de dicha función en los nudos que configuran el elemento y a veces sus derivadas.

Esta hipótesis de discretización es el pilar básico del MEF, por lo que se suele decir de éste que es un método discretizante, de parámetros distribuidos. La aproximación aquí indicada se conoce como la formulación en desplazamiento.

Claramente se han introducido algunas aproximaciones. En primer lugar no es siempre fácil

asegurar que las funciones de interpolación elegidas satisfarán al requerimiento de continuidad de desplazamientos entre elementos adyacentes, por lo que puede violarse la condición de compatibilidad en las fronteras entre unos y otros. En segundo lugar al concentrar las cargas equivalentes en los nudos las condiciones de equilibrio se satisfarán solamente en ellos y no se cumplirán usualmente en las fronteras entre elementos.

El proceso de discretización descrito tiene una justificación intuitiva pero lo que de hecho se sugiere es la minimización de la energía potencial total del sistema para un campo de deformaciones definido por el tipo de elementos utilizado en la discretización.

Con independencia de que más adelante se estudien en detalle, se representan a continuación algunos de los elementos más importantes.

- Elasticidad unidimensional

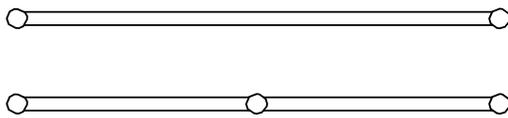


Fig.D2. Elementos para elasticidad unidimensional.

- Elasticidad bidimensional y tridimensional

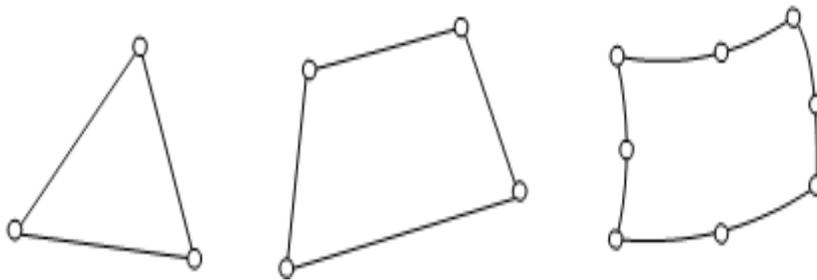


Fig.D3. Elementos para elasticidad bidimensional.

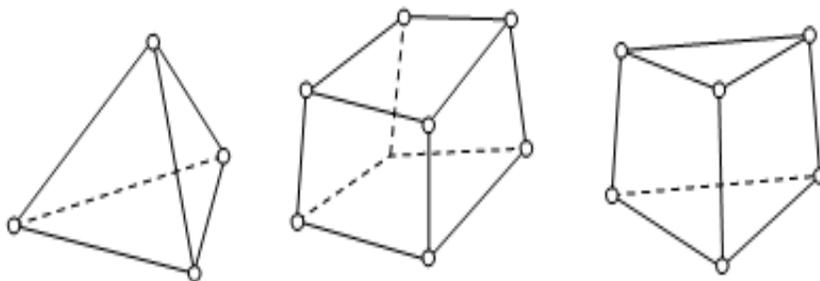


Fig.D4. Elementos para elasticidad tridimensional.

- Elasticidad con simetría de revolución

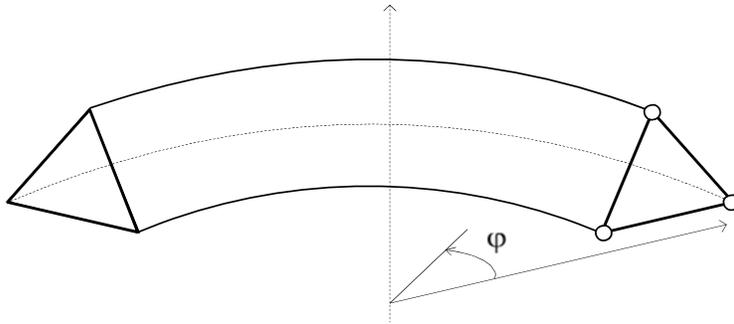


Fig.D5. Elemento axisimétrico.

- Vigas

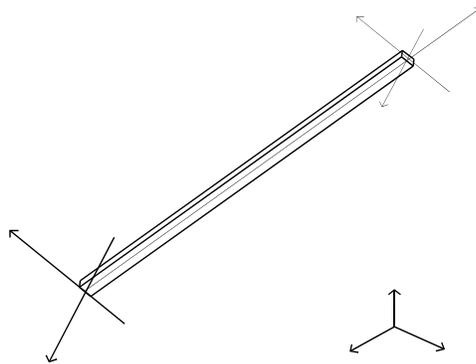


Fig.D6. Elemento viga.

- Flexión de placas planas

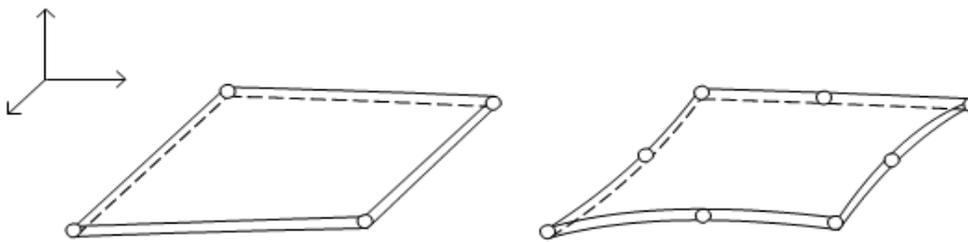


Fig.D7. Elementos placa.

- Cáscaras laminares curvas

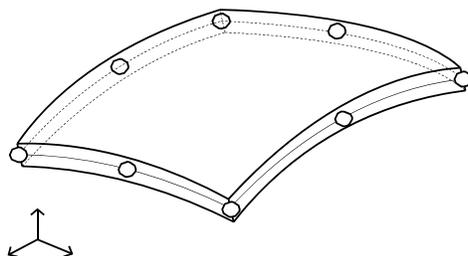


Fig.D8. Elementos cáscara.

D.1.3 Funciones de interpolación

Consideremos un elemento finito cualquiera definido por un número de nudos n . Para facilitar la exposición se supondrá un problema de elasticidad plana. Un punto cualquiera del elemento tiene

un desplazamiento definido por un vector \mathbf{u} , que en este caso tiene dos componentes:

$$\mathbf{u} = \begin{Bmatrix} u(x, y) \\ v(x, y) \end{Bmatrix}$$

Los nudos del elemento tienen una serie de grados de libertad que corresponden a los valores que adopta en ellos el campo de desplazamientos y que forman el vector denominado δ^e . Para el caso plano este vector es:

$$\{\delta^e = U_1 V_1 U_2 V_2 \dots U_n V_n\}$$

En este ejemplo se supone que como deformaciones de los nudos se emplean sólo los desplazamientos pero no los giros, lo cual es suficiente para elasticidad plana. En otros elementos (por ej. vigas o cáscaras) se emplean además los giros.

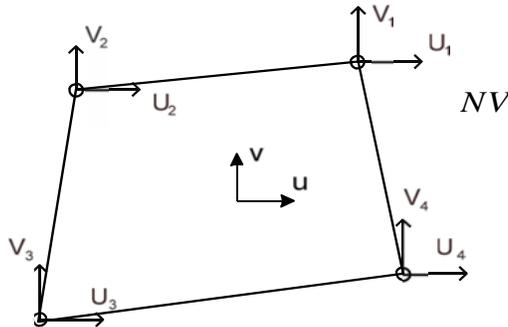


Fig. D9. Deformaciones en un elemento finito.

El campo de deformaciones en el interior del elemento se aproxima haciendo uso de la hipótesis de interpolación de deformaciones:

$$\mathbf{u} = \sum N_i U_i \quad ; \quad \mathbf{v} = \sum N_i V_i$$

donde N_i son las funciones de interpolación del elemento, que son en general funciones de las coordenadas x, y . Nótese que se emplean las mismas funciones para interpolar los desplazamientos u y v , y que ambos desplazamientos se interpolan por separado, el campo u mediante las U_i y el campo v mediante las V_i . Es decir que la misma N_i define la influencia del desplazamiento del nudo i en el desplazamiento total del punto P para las dos direcciones x e y .

La interpolación de deformaciones (1.4) puede ponerse en la forma matricial general:

$$\mathbf{u} = \mathbf{N} \delta^e$$

La matriz de funciones de interpolación \mathbf{N} tiene tantas filas como desplazamientos tenga el punto P y tantas columnas como grados de libertad haya entre todos los nudos del elemento.

Las funciones de interpolación son habitualmente polinomios que deben poderse definir empleando las deformaciones nodales del elemento. Por lo tanto se podrán usar polinomios con tantos términos como grados de libertad tenga el elemento. Para problemas de elasticidad la estructura de esta matriz es normalmente del tipo:

$$\mathbf{N} = \begin{bmatrix} N_1 & \mathbf{0} & N_2 & \mathbf{0} & \dots & \mathbf{0} & N_n & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & N_1 & \mathbf{0} & N_2 & \mathbf{0} & \dots & \mathbf{0} & N_n \end{bmatrix}$$

Sin embargo el aspecto de esta matriz puede ser distinto para otros elementos, como las vigas o las placas a flexión.

Las funciones de interpolación están definidas únicamente para el elemento y son nulas en el exterior de dicho elemento. Estas funciones tienen que cumplir determinadas condiciones y con la expresión anterior se puede deducir que la función de interpolación N_i debe valer **1** en el nudo i y **0** en los restantes nudos. Esta condición resulta evidente si se tiene en cuenta que los términos del vector δ^e son grados de libertad y por lo tanto son independientes y deben poder adoptar cualquier valor.

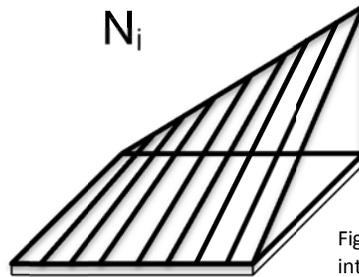


Fig.D10. Función de interpolación.

D.1.4 Criterios de convergencia

Antes de estudiar los criterios para garantizar la convergencia en el MEF es necesario definir dicho concepto en el ámbito del MEF. Se dice que un análisis por el MEF es convergente si al disminuir el tamaño de los elementos, y por lo tanto aumentar el número de nudos y de elementos, la solución obtenida tiende hacia la solución exacta.

Hay que indicar que en el análisis por el MEF se introducen, además de la hipótesis de discretización, otras aproximaciones que son fuentes de error en la solución: integración numérica, errores de redondeo por aritmética finita... El concepto de convergencia aquí analizado se refiere solamente a la hipótesis de discretización prescindiendo de los otros errores que deben ser estudiados aparte y cuyo valor debe en todo caso acotarse.

Las funciones de interpolación elegidas para representar el estado de deformación de un medio continuo deben satisfacer una serie de condiciones a fin que la solución obtenida por el MEF converja hacia la solución real.

D.1.4.1 Criterio 1:

Las funciones de interpolación deben ser tales que cuando los desplazamientos de los nudos del elemento correspondan a un movimiento de sólido rígido no aparezcan tensiones en el elemento.

Este criterio se puede enunciar también de forma más sencilla: las funciones de interpolación deben ser capaces de representar los desplazamientos como sólido rígido sin producir tensiones en el elemento.

Esta condición es evidente pues todo sólido que se desplaza como un sólido rígido no sufre ninguna deformación ni por lo tanto tensión. Sin embargo adoptando unas funciones de interpolación incorrectas pueden originarse tensiones al moverse como sólido rígido.

Por ejemplo en la figura siguiente los elementos del extremo se desplazan como un sólido rígido al no existir tensiones más allá de la fuerza aplicada.

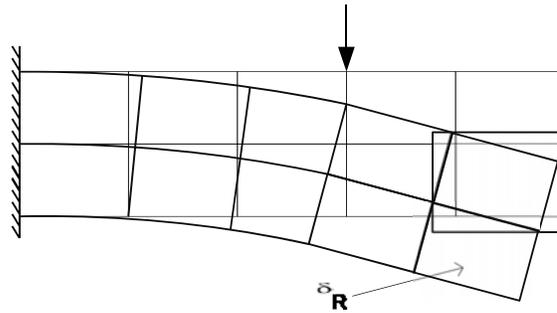


Fig. D11. Deformación de sólido rígido.

Empleando la formulación desarrollada más adelante, si se aplican unas deformaciones en los nudos de valor δ^R que representan un movimiento de sólido rígido, las deformaciones unitarias en el interior del elemento son:

$$\boldsymbol{\varepsilon}^R = \mathbf{B} \cdot \delta^R$$

Según este criterio las tensiones correspondientes deben ser nulas en todo punto del elemento:

$$\boldsymbol{\sigma} = \mathbf{D} \cdot \boldsymbol{\varepsilon}^R = \mathbf{D} \cdot \mathbf{B} \cdot \delta^R = \mathbf{0}$$

D.1.4.2 Criterio 2:

Las funciones de interpolación deben ser tales que cuando los desplazamientos de los nudos correspondan a un estado de tensión constante este estado tensional se alcance en realidad en el elemento.

Claramente, a medida que los elementos se hacen más pequeños, el estado de tensiones que hay en ellos se acerca al estado uniforme de tensiones. Este criterio lo que exige es que los elementos sean capaces de representar dicho estado de tensión constante.

Se observa que este criterio de hecho es un caso particular del criterio 1 ya que un movimiento como sólido rígido (con tensión nula) es un caso particular de un estado de tensión constante. En muchas ocasiones ambos criterios se formulan como uno sólo.

A los elementos que satisfacen los criterios 1 y 2 se les llama elementos completos.

D.1.4.3 Criterio 3:

Las funciones de interpolación deben ser tales que las deformaciones unitarias que se produzcan en las uniones entre elementos deben ser finitas. Esto es lo mismo que decir que debe existir continuidad de desplazamientos en la unión entre elementos aunque puede haber discontinuidad en las deformaciones unitarias (y por lo tanto en las tensiones, que son proporcionales a ellas).

La figura que se muestra a continuación ilustra las posibles situaciones para un caso unidimensional donde la única incógnita es el desplazamiento u en la dirección x . En la situación de la izquierda existe una discontinuidad en el desplazamiento u que da lugar a una deformación unitaria infinita: esta situación no está permitida por el criterio 3. En la de la derecha la deformación es continua aunque la deformación unitaria no lo es: esta situación está permitida por el criterio 3.

Este criterio debe cumplirse para poder calcular la energía elástica U almacenada en toda la

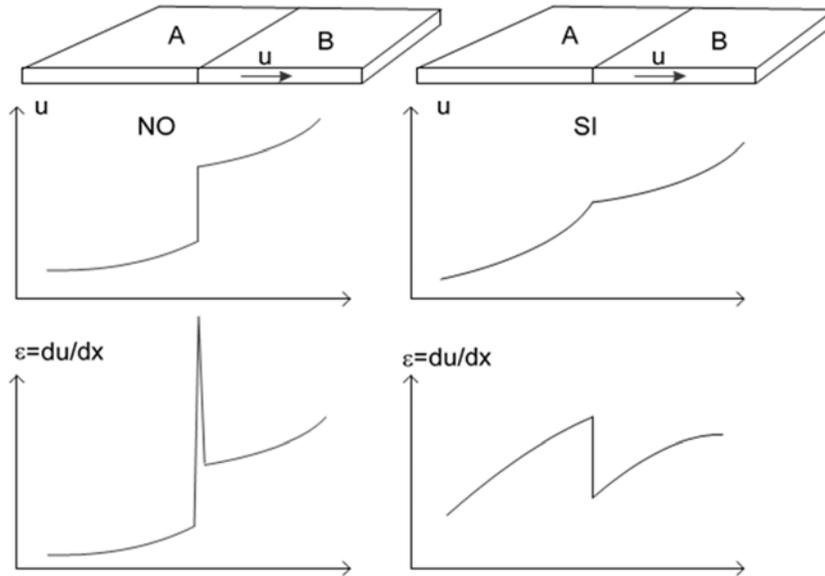


Fig.D12. Criterio de convergencia 3 en una dimensión.

estructura como suma de la energía de todos los elementos:

$$U = \frac{1}{2} \int_V \sigma^T \cdot \epsilon \cdot dv = \frac{1}{2} \sum_e \sigma^T \cdot \epsilon \cdot dv + U_{cont}$$

donde el sumando U_{cont} representa la energía elástica acumulada en el contorno entre los elementos, que debe ser nula.

Si este requerimiento no se cumple las deformaciones no son continuas y existen deformaciones unitarias ϵ infinitas en el borde entre elementos. Si la misma en el contorno es infinita, la energía que se acumula en él es:

$$U_{cont} = \frac{1}{2} \int_{v=0} \sigma^T \cdot (\infty) \cdot dv = \textit{indeterminado}$$

ya que, aunque el volumen de integración (volumen del contorno) es nulo, su integral puede ser distinta de cero con lo que se almacena energía en los bordes entre elementos, lo cual no es correcto.

Sin embargo, si la deformación unitaria en el contorno es finita (aunque no sea continua entre los elementos unidos), la energía que se acumula es:

$$U_{cont} = \frac{1}{2} \int_{v=0} \sigma^T \cdot \epsilon_{cont} \cdot dv = 0$$

En el caso plano o espacial este requerimiento aplica a la componente del desplazamiento perpendicular al borde entre elementos ya que ésta es la única que acumula energía.

Este criterio puede expresarse de manera más general diciendo que en los contornos de los

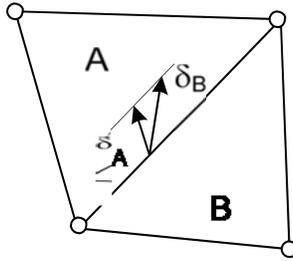


Fig. D13. Compatibilidad de desplazamientos en el contorno.

elementos deben ser continuas las funciones de interpolación y sus derivadas hasta un orden $n-1$, siendo n el orden de las derivadas existentes en la expresión de la energía potencial Π del sistema. Es decir que las funciones de interpolación deben ser continuas de tipo C^{n-1} .

El orden n de las derivadas existentes en la energía potencial Π del sistema siempre es la mitad del orden de la ecuación diferencial que gobierna el problema m ($n=m/2$).

Para elementos de tipo celosía o viga este requerimiento es fácil de cumplir pues la unión entre elementos se hace en puntos discretos y se usan los mismos desplazamientos y giros para todos los elementos que se unen en un nudo.

Para elasticidad plana la ecuación diferencial es de orden $m=2$, con lo que energía potencial es de orden $n=1$. En efecto, esta última se expresa en términos de ϵ que son las derivadas primeras de las deformaciones. Luego las funciones de interpolación deben ser continuas en los contornos de tipo C^0 , es decir no se exige continuidad a la derivada de la función de interpolación en el contorno del elemento sino sólo a la propia función.

Para problemas de flexión de vigas y de placas delgadas la ecuación diferencial es de orden $m=4$, luego la energía potencial es de orden $n=2$. Por lo tanto las funciones de interpolación elegidas deben ser continuas C^2 en el contorno del elemento: tanto la función como su derivada primera deben ser continuas.

A los elementos que cumplen este tercer criterio se les llama compatibles.

D.1.4.4 Resumen de los tres criterios

Los criterios 1 y 2 pueden agruparse de manera más matemática diciendo que las funciones de interpolación deben permitir representar cualquier valor constante de su derivada n -sima en el interior del elemento (siendo n el orden de la derivada necesaria para pasar de las deformaciones a las deformaciones unitarias, que es el orden de derivación de las antedichas en el potencial).

Esto puede comprobarse mediante el siguiente sencillo razonamiento: los criterios 1 y 2 obligan a representar cualquier valor constante (incluido el valor nulo) de la tensión σ , lo cual equivale a representar cualquier valor constante (incluido el valor nulo) de la deformación unitaria ϵ . Pero la misma es la derivada n -sima de la deformación, en consecuencia es necesario poder representar cualquier valor constante de dicha derivada. Esto se satisface siempre si se adoptan, como funciones de interpolación, polinomios completos de orden n como mínimo.

Por ejemplo, si se adopta una función lineal $N=Ax+B$, sólo es válida para problemas de elasticidad ($n=1$) ya que se representa cualquier valor constante de la derivada n -sima $dN/dx=A$. Sin embargo no vale

Grupo Diseño, Gestión y Desarrollo de Nuevos Productos

para problemas de flexión de vigas ni de placas delgadas ($n=2$) pues siempre es $d^2N/dx^2=0$, es decir que no se puede representar cualquier valor constante de la derivada segunda.

El criterio 3 exige que las deformaciones unitarias sean finitas en el contorno entre los elementos. Como éstas son las derivadas n -simas de las deformaciones, lo que se exige es que haya continuidad de las mismas y sus derivadas hasta orden $n-1$ en el contorno del elemento. Esto es equivalente a imponer la compatibilidad de desplazamientos en él.

Como resumen de los tres criterios, para problemas de elasticidad ($n=1$) es necesario emplear polinomios completos de orden 1 con continuidad C^0 entre ellos para garantizar la convergencia. Es suficiente con usar funciones del tipo lineal que aproximan la solución mediante una línea quebrada aunque se produzcan discontinuidades en las tensiones entre los elementos, como se indica en la figura.

Para problemas de flexión de vigas y placas ($n=2$) es necesario emplear como mínimo polinomios de

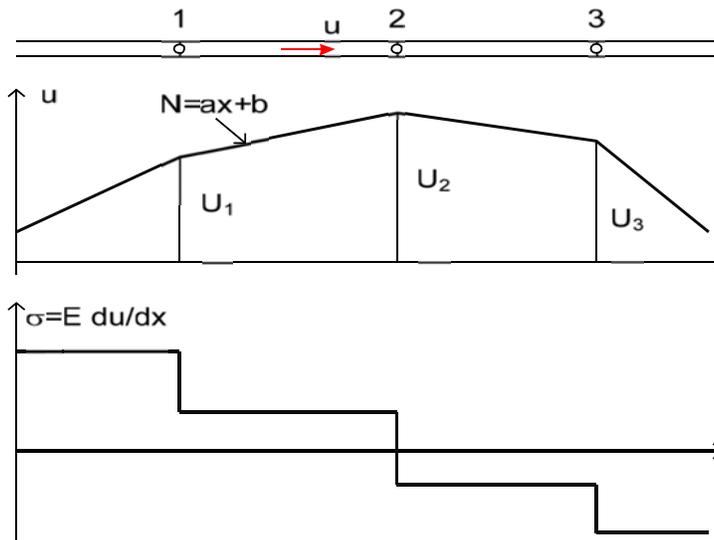


Fig.D14. Tensiones.

grado 2, con continuidad C^1 entre ellos, es decir que hay que garantizar la continuidad de la flecha y el giro entre los elementos. En la práctica, para la flexión de vigas planas se usan 4 parámetros para ajustar la solución (flecha y giro en cada extremo) por lo que el tipo de funciones empleadas son polinomios de grado 3.

Con respecto a la velocidad de convergencia se pueden resumir las siguientes conclusiones de los análisis efectuados: Si se utiliza una discretización uniforme con elementos de tamaño nominal h y se usa para interpolar los desplazamientos un polinomio completo de grado c (que representa exactamente variaciones del desplazamiento de dicho grado) el error local en los desplazamientos se estima que es del orden $O(h^{c+1})$.

Figura D15

Respecto a las tensiones son las derivadas n -simas de los desplazamientos, luego el error en ellas es de orden $O(h^{c+1-m})$.

D.2 Ecuaciones generales

D.2.1 Campo de deformaciones

El campo de deformaciones en un punto cualquiera del dominio está definido por un vector u que tiene tantas componentes como deformaciones existen en él. Para el caso de un problema espacial es:

$$\mathbf{u} = \begin{cases} u(x, y, z) \\ v(x, y, z) \\ w(x, y, z) \end{cases}$$

Si se considera un elemento finito cualquiera el campo de deformaciones en su interior se aproxima, haciendo uso de la hipótesis de interpolación, como un promedio ponderado de las deformaciones en cada uno de los n nudos del elemento siendo los factores de ponderación las funciones de interpolación:

$$\mathbf{u} = \sum N_i U_i \quad ; \quad \mathbf{v} = \sum N_i V_i \quad ; \quad \mathbf{w} = \sum N_i W_i$$

Esta interpolación puede ponerse en forma matricial:

$$\mathbf{u} = \mathbf{N} \cdot \delta^e$$

donde δ^e es el vector de todas las deformaciones nodales del elemento (figura 2.1):

$$\delta^e = \{U_1 \ V_1 \ W_1 \ U_2 \ V_2 \ W_2 \ \dots \ U_n \ V_n \ W_n\}^T$$

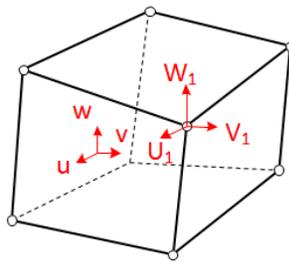


Fig.D15. Deformaciones en un elemento finito.

La matriz de funciones de interpolación \mathbf{N} tiene tres filas y tantas columnas como grados de libertad haya entre todos los nudos del elemento. La estructura de esta matriz siempre es del tipo:

$$\mathbf{N} = \left[\begin{array}{ccc|ccc|ccc} N_1 & 0 & 0 & \dots & \dots & N_n & 0 & 0 \\ 0 & N_1 & 0 & \dots & \dots & 0 & N_n & 0 \\ 0 & 0 & N_1 & \dots & \dots & 0 & 0 & N_n \end{array} \right]$$

D.2.2 Deformaciones unitarias

Las deformaciones unitarias en un punto cualquiera del elemento, con la suposición de pequeñas deformaciones, son:

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{zx} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} \\ \frac{\partial v}{\partial y} \\ \frac{\partial w}{\partial z} \\ \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \\ \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \\ \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \end{Bmatrix}$$

Se pueden poner en la forma matricial siguiente:

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{zx} \end{Bmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial y} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial z} \\ \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial x} & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial z} & \frac{\partial}{\partial y} \\ \frac{\partial}{\partial z} & 0 & \frac{\partial}{\partial x} \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} u \\ v \\ w \end{Bmatrix} = \boldsymbol{\partial} \mathbf{u}$$

En esta expresión se identifica el operador matricial $\boldsymbol{\partial}$ que permite pasar de las deformaciones de un punto \mathbf{u} a las unitarias $\boldsymbol{\varepsilon}$. Este operador tiene tantas filas como deformaciones unitarias haya en el problema y tantas columnas como componentes tenga el campo de desplazamientos \mathbf{u} .

Sustituyendo las deformaciones \mathbf{u} en función de las deformaciones nodales mediante las funciones de interpolación, se obtiene:

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \boldsymbol{\partial} \mathbf{u} = \boldsymbol{\partial} \mathbf{N} \boldsymbol{\delta}^e$$

En esta relación se identifica la matriz \mathbf{B} :

$$\mathbf{B} = \boldsymbol{\partial} \mathbf{N}$$

Tal que se cumple que:

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \mathbf{B} \boldsymbol{\delta}^e$$

Esta matriz \mathbf{B} relaciona las deformaciones de los nudos del elemento $\boldsymbol{\delta}^e$ con las deformaciones unitarias en un punto interior cualquiera del elemento. Por lo tanto \mathbf{B} representa el campo de deformaciones unitarias que se supone existe en el interior del elemento finito como consecuencia de la hipótesis de interpolación de deformaciones efectuada y juega un papel fundamental en el método de los elementos finitos.

Dada la estructura de la matriz \mathbf{N} , la matriz \mathbf{B} se puede poner siempre en la forma:

$$\mathbf{B} = \boldsymbol{\partial} \cdot \mathbf{N} = \boldsymbol{\partial} \cdot \begin{bmatrix} N_1 & 0 & 0 & \dots & \dots & N_n & 0 & 0 \\ 0 & N_1 & 0 & \dots & \dots & 0 & N_n & 0 \\ 0 & 0 & N_1 & \dots & \dots & 0 & 0 & N_n \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{B} = [\mathbf{B}_1 \quad \mathbf{B}_2 \quad \dots \quad \mathbf{B}_n]$$

Cada una de las matrices \mathbf{B}_i tiene la forma siguiente:

$$B_i = \partial \cdot \begin{bmatrix} N_i & 0 & 0 \\ 0 & N_i & 0 \\ 0 & 0 & N_i \end{bmatrix} = \begin{matrix} \frac{\partial N_i}{\partial x} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\partial N_i}{\partial y} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial N_i}{\partial z} \\ \frac{\partial N_i}{\partial y} & \frac{\partial N_i}{\partial x} & 0 \\ 0 & \frac{\partial N_i}{\partial z} & \frac{\partial N_i}{\partial y} \\ \frac{\partial N_i}{\partial z} & 0 & \frac{\partial N_i}{\partial x} \end{matrix}$$

Aunque el valor de B se ha obtenido para el caso de elasticidad tridimensional su valor en función de ∂ y N es totalmente general para otros tipos de problemas de elasticidad como flexión de placas, problemas de revolución, etc.

D.2.3 Estado de tensiones. Ecuaciones constitutivas.

Las tensiones en un punto cualquiera del dominio están definidas por el tensor de tensiones en dicho punto, cuya expresión general es:

$$\sigma = \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \sigma_{xy} \\ \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} \end{Bmatrix}$$

Asimismo se conoce la ecuación constitutiva del material que forma el dominio y que relaciona las tensiones con las deformaciones unitarias. Para un material elástico lineal esta ecuación constitutiva se puede poner en la forma:

$$\sigma = D \cdot (\varepsilon - \varepsilon_0) + \sigma_0$$

Siendo:

- D la matriz elástica, que para un material elástico lineal es constante y depende de sólo dos parámetros: el módulo de elasticidad E y el módulo de Poisson ν .
- ε_0 el vector de las deformaciones unitarias iniciales existentes en el material en el punto considerado, que deben ser conocidas. Las más habituales son las debidas a las temperaturas, aunque pueden incluirse en ellas las debidas a los errores de forma, etc.
- σ_0 las tensiones iniciales presentes en el material que normalmente son tensiones residuales debidas a procesos anteriores sobre el material (p.e. tratamiento térmico) y que por lo tanto son conocidas.

Las expresiones particulares de la matriz elástica D y de los vectores ε_0 y σ_0 dependen del tipo de problema considerado.

D.2.4 Ecuación de equilibrio de un elemento

Una vez que han quedado establecidas las expresiones que relacionan los desplazamientos, las

Grupo Diseño, Gestión y Desarrollo de Nuevos Productos

deformaciones unitarias y las tensiones en función de los desplazamientos de los nudos se está ya en condiciones de calcular las ecuaciones de equilibrio de un elemento finito. Si se considera un elemento finito cualquiera las fuerzas que actúan sobre él, en el caso más general, son las siguientes:

- Fuerzas exteriores de volumen aplicadas en el interior del elemento \mathbf{q}_v , que son en general variables dentro del elemento y tienen tantas componentes como desplazamientos haya en cada punto.
- Fuerzas exteriores de superficie aplicadas en el contorno libre del elemento \mathbf{q}_s , que son en general variables a lo largo del contorno y tienen tantas componentes como desplazamientos tenga cada punto del contorno. Al contorno sobre el que actúan las fuerzas de superficie se le denomina s .
- Fuerzas interiores \mathbf{q}_c aplicadas en la superficie del contorno de unión del elemento con los elementos vecinos, que son desconocidas. A dicho contorno de unión se le denomina c .

Fuerzas exteriores puntuales aplicadas sobre los nudos del elemento \mathbf{P}_N^e .

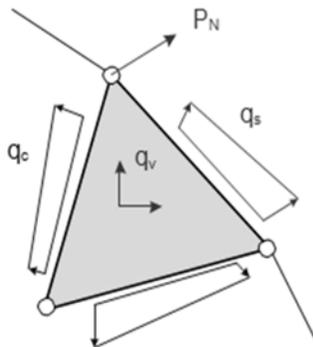


Fig.D16. Fuerzas actuantes sobre un elemento finito.

El trabajo virtual que producen estas fuerzas es:

$$\delta W^e = \int_v \delta \mathbf{u}^T \mathbf{q}_v \, dv + \int_s \delta \mathbf{u}^T \mathbf{q}_s \, ds + \int_c \delta \mathbf{u}^T \mathbf{q}_c \, ds + \delta \delta^e \mathbf{P}_N^e$$

donde $\delta \mathbf{u}$ es una variación virtual del campo de deformaciones \mathbf{u} y $\delta \delta^e$ es la variación correspondiente a los grados de libertad de los nudos. Durante estas variaciones las fuerzas exteriores se mantienen constantes.

Aplicando el principio de los trabajos virtuales se obtiene que, para que haya equilibrio, el trabajo virtual de las fuerzas debe ser igual a la variación de la energía elástica \mathbf{U} acumulada en el elemento:

$$\delta W^e = \delta U^e = \int_v \delta \boldsymbol{\varepsilon}^T \boldsymbol{\sigma} \, dv$$

donde $\delta \boldsymbol{\varepsilon}$ es la variación en las deformaciones unitarias producida por la variación en las deformaciones $\boldsymbol{\varepsilon}$. Por lo tanto la ecuación de equilibrio del elemento es:

$$\int_v \delta \mathbf{u}^T \mathbf{q}_v \, dv + \int_s \delta \mathbf{u}^T \mathbf{q}_s \, ds + \int_c \delta \mathbf{u}^T \mathbf{q}_c \, ds + \delta \delta^e \mathbf{P}_N^e = \int_v \delta \boldsymbol{\varepsilon}^T \boldsymbol{\sigma} \, dv \quad (1)$$

Aplicando la hipótesis de interpolación de deformaciones la variación virtual del campo de deformaciones es:

$$\delta u = N \cdot \delta \delta^e$$

La variación de las deformaciones unitarias se relaciona con la variación de las deformaciones nodales a través de la matriz B :

$$\delta \varepsilon = B \cdot \delta \delta^e$$

Sustituyendo las variaciones δu y $\delta \varepsilon$ en la expresión (1) se obtiene la ecuación de equilibrio aproximada mediante la hipótesis de interpolación de deformaciones:

$$\delta \delta^{eT} \left[\int_v N^T q_v dv + \int_s N^T q_s ds + \int_c N^T q_c ds + P_N^e \right] = \delta \delta^{eT} \left[\int_v B^T \sigma dv \right]$$

Considerando que esta ecuación se debe cumplir para cualquier variación arbitraria de las deformaciones, se obtiene:

$$\int_v N^T q_v dv + \int_s N^T q_s ds + \int_c N^T q_c ds + P_N^e = \int_v B^T \sigma dv$$

Esta ecuación representa el equilibrio del elemento finito. Antes de seguir desarrollándola la integral debida a las fuerzas distribuidas q_c sobre el contorno de unión (desconocidas) se sustituye por:

$$\int_c N^T q_c ds = P_c^e$$

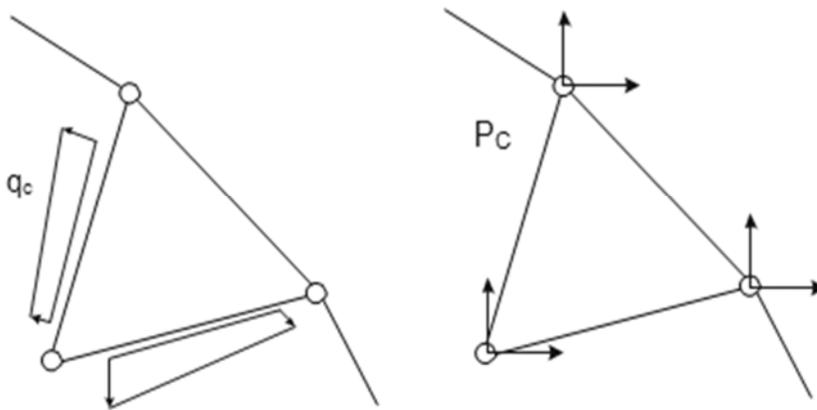


Fig.D17. Fuerzas de conexión entre elementos.

donde P_N^e son unas fuerzas que están aplicadas sobre los nudos del elemento y que son equivalentes a las fuerzas distribuidas aplicadas sobre los contornos de unión con los elementos vecinos. Ambas fuerzas producen el mismo trabajo virtual. La ecuación de equilibrio del elemento queda finalmente:

$$\int_v N^T q_v dv + \int_s N^T q_s ds + P_c^e + P_N^e = \int_v B^T \sigma dv$$

Sustituyendo en ella el valor de la tensión mediante la ecuación constitutiva ($\sigma = D \cdot (\varepsilon - \varepsilon_0) + \sigma_0$) se obtiene:

$$\int_v \mathbf{N}^T \mathbf{q}_v \, dv + \int_s \mathbf{N}^T \mathbf{q}_s \, ds + \mathbf{P}_c^e + \mathbf{P}_N^e = \int_v \mathbf{B}^T (\mathbf{D}\boldsymbol{\varepsilon} - \mathbf{D}\boldsymbol{\varepsilon}_0 + \boldsymbol{\sigma}_0) \, dv$$

Sustituyendo a continuación el valor de la deformación unitaria en función de la matriz \mathbf{B} se obtiene:

$$\int_v \mathbf{N}^T \mathbf{q}_v \, dv + \int_s \mathbf{N}^T \mathbf{q}_s \, ds + \mathbf{P}_c^e + \mathbf{P}_N^e = \int_v \mathbf{B}^T (\mathbf{D}\mathbf{B}\boldsymbol{\delta}^e - \mathbf{D}\boldsymbol{\varepsilon}_0 + \boldsymbol{\sigma}_0) \, dv$$

Reordenando los distintos términos se llega a:

$$\int_v \mathbf{B}^T \mathbf{D} \mathbf{B} \, dv \, \boldsymbol{\delta}^e = \int_v \mathbf{N}^T \mathbf{q}_v \, dv + \int_s \mathbf{N}^T \mathbf{q}_s \, ds + \int_v \mathbf{B}^T \mathbf{D} \boldsymbol{\varepsilon}_0 \, dv - \int_v \mathbf{B}^T \boldsymbol{\sigma}_0 \, dv + \mathbf{P}_c^e + \mathbf{P}_N^e$$

Esta es la ecuación final de equilibrio del elemento finito considerado. En ella se identifican los siguientes términos:

- Matriz de rigidez del elemento finito. Se trata de una matriz cuadrada simétrica de tamaño igual al número de grados de libertad del elemento.

$$\mathbf{K}^e = \int_v \mathbf{B}^T \mathbf{D} \mathbf{B} \, dv$$

- Vector de fuerzas nodales equivalentes debido a las fuerzas actuantes por unidad de volumen.

$$\mathbf{P}_v^e = \int_v \mathbf{N}^T \mathbf{q}_v \, dv$$

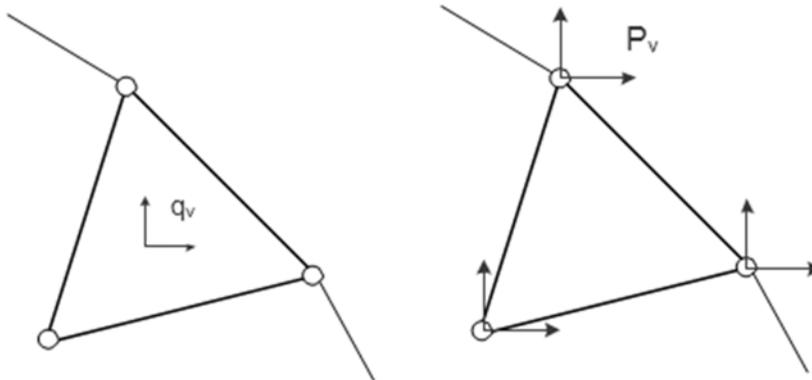


Fig.18. Fuerzas nodales equivalentes a las fuerzas de volumen.

- Vector de fuerzas nodales equivalentes a las fuerzas exteriores de superficie.

$$\mathbf{P}_s^e = \int_s \mathbf{N}^T \mathbf{q}_s \, ds$$

- Vector de fuerzas nodales equivalentes producidas por las deformaciones iniciales

existentes en el material:

$$\mathbf{P}_T^e = \int_v \mathbf{B}^T \mathbf{D} \boldsymbol{\varepsilon}_0 \, dv$$

- Vector de fuerzas nodales equivalentes debidas a las tensiones iniciales existentes en el material:

$$\mathbf{P}_b^e = - \int_v \mathbf{B}^T \boldsymbol{\sigma}_0 \, dv$$

La ecuación de equilibrio del elemento puede ponerse en forma compacta como:

$$\mathbf{K}^e \boldsymbol{\delta}^e = \mathbf{P}_v^e + \mathbf{P}_s^e + \mathbf{P}_T^e + \mathbf{P}_b^e + \mathbf{P}_c^e + \mathbf{P}_N^e$$

La misma está referida al sistema de ejes en el que se hayan definido las coordenadas y las deformaciones de los nudos y al que lógicamente también se habrán referido las distintas fuerzas actuantes. En ella son conocidos todos los términos de carga salvo el debido a las fuerzas distribuidas interiores \mathbf{P}_c^e que se producen en el contorno de unión con los elementos vecinos.

D.2.5 Ecuación de equilibrio del conjunto

La ecuación de equilibrio obtenida para un elemento puede aplicarse a todos y cada uno de los mismos en que se ha dividido el sistema continuo. De esta manera se garantiza el equilibrio de todos y cada uno de ellos individualmente apareciendo en dichas ecuaciones las fuerzas de conexión entre unos y otros.

Para obtener la ecuación de equilibrio de toda la estructura es necesario además imponer el equilibrio de las fronteras de unión entre los elementos. En estas fronteras se han introducido las fuerzas de conexión entre los elementos \mathbf{q}_e que a su vez han dado lugar a las fuerzas nodales equivalentes correspondientes \mathbf{P}_e y que como se ha visto son energéticamente equivalentes a ellas. Por lo tanto el considerar el equilibrio de las fronteras es equivalente a considerar el equilibrio de los nudos de unión entre los elementos.

Si se plantean conjuntamente las ecuaciones de equilibrio de todos los nudos de unión entre todos los elementos se obtiene un conjunto de ecuaciones que representa el equilibrio de toda la estructura. Estas ecuaciones se obtienen por ensamblado de las de equilibrio de los distintos elementos finitos que la forman, en la forma:

$$\bigcup_e [\mathbf{K}^e \boldsymbol{\delta}^e] = \bigcup_e [\mathbf{P}_v^e + \mathbf{P}_s^e + \mathbf{P}_T^e + \mathbf{P}_b^e + \mathbf{P}_N^e] + \bigcup_e \mathbf{P}_c^e$$

donde se ha empleado el símbolo \bigcup_e para indicar el ensamblado de las distintas magnitudes según los grados de libertad de la estructura.

En este proceso de ensamblado se cancelan todas las fuerzas de conexión entre unos elementos y los vecinos, pues se trata de fuerzas iguales y de signo contrario:

$$\bigcup_e \mathbf{P}_c^e = \mathbf{0}$$

Al ser el sistema lineal el término de la izquierda puede ponerse siempre como:

$$\bigcup_e [K^e \delta^e] = K \Delta$$

Siendo:

- K la matriz de rigidez de la estructura completa obtenida por ensamblaje de las mismas de los distintos elementos según los grados de libertad correspondientes a cada uno.
- Δ el vector de grados de libertad de toda la estructura que agrupa a los mismos de todos los nudos.

De esta manera la ecuación de equilibrio del conjunto de la estructura queda:

$$K \Delta = P_v + P_s + P_T + P_b + P_N$$

En esta ecuación:

- P_N es el vector de fuerzas exteriores actuantes sobre los nudos de unión de los elementos.
- P_v, P_s, P_T, P_b , son los vectores de fuerzas nodales equivalentes producidos por las fuerzas de volumen, de superficie, las deformaciones iniciales y las tensiones iniciales. Son todos conocidos y se obtienen por ensamblado de los correspondientes a los distintos elementos según los nudos y direcciones adecuados. Respecto al vector P_b hay que decir que si el estado de tensiones iniciales actuantes sobre la estructura está auto-equilibrado, este vector es nulo. Esto ocurre normalmente con las tensiones residuales. Sin embargo éstas no están equilibradas si la estructura se obtiene partir de un material con unas tensiones auto-equilibradas y se elimina parte de ese material.

D.2.6 Condiciones de ligadura

La ecuación de equilibrio deducida antes representa el equilibrio del conjunto de la estructura considerando todos los elementos que la forman así como todas las fuerzas exteriores. Para poder resolverla es necesario imponer las condiciones de ligadura que indican cómo está sustentada.

La introducción de estas condiciones de ligadura se efectúa exactamente igual que en el método de rigidez para estructuras reticulares.

D.2.7 Energía potencial total

La densidad de energía elástica acumulada en un punto del elemento es:

$$U_0^e = \int_0^e \sigma^T d\varepsilon = \int_0^e (DB\delta^e - D\varepsilon_0 + \sigma_0)^T d\varepsilon = \frac{1}{2} \varepsilon^T D \varepsilon - \varepsilon_0^T D \varepsilon + \sigma_0^T \varepsilon$$

El potencial total acumulado en un elemento finito cualquiera es igual a la suma de la energía elástica acumulada en él más el potencial de las fuerzas exteriores V :

$$\Pi^e = U^e + V^e = \int_v U_0^e dv + V^e$$

$$\Pi^e = \frac{1}{2} \int_v \varepsilon^T D \varepsilon dv - \int_v \varepsilon^T D \varepsilon_0 dv + \int_v \varepsilon^T \sigma_0 dv - \int_v \mathbf{u}^T \mathbf{q}_v dv - \int_s \mathbf{u}^T \mathbf{q}_s ds - \int_c \mathbf{u}^T \mathbf{q}_c ds - \delta^{eT} P_N^e$$

Sustituyendo las deformaciones unitarias $\boldsymbol{\varepsilon}$ y los desplazamientos \mathbf{u} en función de las deformaciones nodales mediante las matrices \mathbf{B} y \mathbf{N} se obtiene:

$$\begin{aligned} \Pi^e = & \frac{1}{2} \delta^{eT} \int_v \mathbf{B}^T \mathbf{D} \mathbf{B} d\mathbf{v} \delta^e - \delta^{eT} \int_v \mathbf{B}^T \mathbf{D} \boldsymbol{\varepsilon}_0 d\mathbf{v} + \delta^{eT} \int_v \mathbf{B}^T \boldsymbol{\sigma}_0 d\mathbf{v} - \delta^{eT} \int_v \mathbf{N}^T \mathbf{q}_v d\mathbf{v} \\ & - \delta^{eT} \int_s \mathbf{N}^T \mathbf{q}_s ds - \delta^{eT} \int_c \mathbf{N}^T \mathbf{q}_c ds - \delta^{eT} \mathbf{P}_N^e \end{aligned}$$

En esta expresión se identifican la matriz de rigidez del elemento así como los distintos vectores de fuerzas nodales equivalentes, con lo que se puede poner en forma más compacta:

$$\Pi^e = \frac{1}{2} \delta^{eT} \mathbf{K}^e \delta^e - \delta^{eT} \mathbf{P}_T^e - \delta^{eT} \mathbf{P}_b^e - \delta^{eT} \mathbf{P}_v^e - \delta^{eT} \mathbf{P}_s^e - \delta^{eT} \mathbf{P}_c^e - \delta^{eT} \mathbf{P}_N^e$$

El potencial total para el medio continuo se obtiene sumando el potencial de cada uno de los elementos que lo forman:

$$\Pi = \sum_e \Pi^e$$

Al sumar el potencial de los distintos elementos se pueden ir ensamblando la matriz de rigidez y los vectores de fuerzas de los elementos según los distintos grados de libertad de la estructura para obtener la siguiente expresión:

$$\Pi = \frac{1}{2} \Delta^T \mathbf{K} \Delta - \Delta^T \mathbf{P}_T - \Delta^T \mathbf{P}_b - \Delta^T \mathbf{P}_v - \Delta^T \mathbf{P}_s - \Pi_c - \Delta^T \mathbf{P}_N$$

En ella aparecen la matriz de rigidez de toda la estructura y los correspondientes vectores de grados de libertad y fuerzas nodales equivalentes.

El término Π_c corresponde al potencial acumulado en las fronteras de conexión entre los elementos por las fuerzas de conexión \mathbf{q}_c . Este término es nulo si las funciones de interpolación se eligen con la condición que no se acumule energía en las fronteras, como así se hace (véase el tercer criterio de convergencia).

El equilibrio de la estructura implica que el potencial total sea estacionario para cualquier variación de las deformaciones nodales:

$$\delta \Pi = 0 \quad \rightarrow \quad \frac{\partial \Pi}{\partial \Delta} = 0$$

Se obtiene así la ecuación de equilibrio de toda la estructura:

$$\mathbf{K} \Delta = \mathbf{P}_T + \mathbf{P}_b + \mathbf{P}_v + \mathbf{P}_s + \mathbf{P}_N$$

ANEXO E: Ejemplos de implementación de PDM

Éste ejemplo de implementación de un sistema PDM surge a partir de una solicitud a la UTN Facultad Regional San Francisco por parte de una industria metalúrgica de la misma ciudad para estudiar la factibilidad de la implementación de un proyecto para la instalación de un sistema nuevo PDM.

A partir de reuniones entre la empresa y el Grupo de Diseño GDNP (Gestión y Desarrollo de Nuevos Productos) surgieron una serie de requisitos y objetivos a cumplir por el sistema:

- **Mejorar gestión de datos de ingeniería.** Los usuarios CAD seguirán trabajando con 3D pero lo harán bajo una plataforma nueva PDM. Serán provistos de mejores herramientas en términos de eficiencia, compatibilidad y facilidad de uso.
- **Lograr acceso global a la documentación y automatización.** Otras áreas o departamentos de Metalúrgica Micrón Fresar SRL tienen la necesidad de acceder a la documentación creada por ingeniería. También crean sus propios documentos que están relacionados a los de ingeniería y proyectos. El nuevo sistema les permitirá crear, editar, mirar y publicar estos documentos en un ambiente seguro y fácil de usar.
- **Mejorar la comunicación a través de toda la empresa.** La información atraviesa muchos departamentos durante un proyecto. La nueva plataforma de PDM le ayudará a Metalúrgica Micrón Fresar SRL a modernizar y automatizar el curso de esta información y dejarla disponible dentro de toda la empresa, en cada departamento, para quién esté facultado de acceder a ella. Esto eliminará la necesidad de comunicar acciones, diseños o datos de modo manual a cada momento.

Descripción de funcionalidades propuestas

La gestión del Documento

Una de las funciones primarias de PDM es la gestión del documento. La solución PDM deberá tener una interface fácil de utilizar y estar embebido en Windows Explorer, lo cual significa que en cada acción Windows mostrará un cuadro de diálogo. Deberá ser accesible por cualquier usuario que utilice el ambiente de Microsoft Office. Es por ello que su adopción será muy fácil de adoptar y en un muy corto plazo.

Los datos son mostrados en una estructura normal de carpetas. PDM controlara los accesos a los documentos según el nivel de acceso que el usuario tiene. Los documentos parecen estar en un disco local, pero realmente se guardan en un servidor.

Grupo Diseño, Gestión y Desarrollo de Nuevos Productos

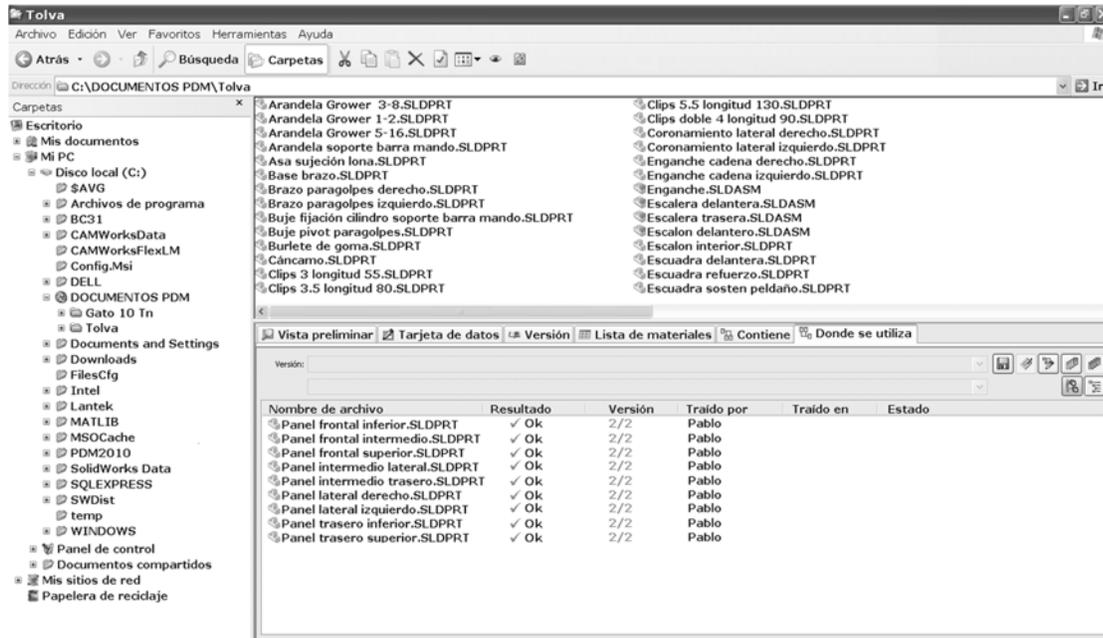


Fig.E1. Documentos del proyecto en el sistema PLM.

Los Meta Datos (información de datos de documentos) son mostrados como columnas adicionales o en Fichas de Registros (Tarjetas de datos). También los vínculos entre documentos son mostrados en una interface normal como el Explorador de Windows.

En la pestaña de pre visualización el usuario puede ver el contenido de algunos tipos de archivos sin necesidad de tener la aplicación instalada. Para SolidWorks cada usuario, aún sin tenerlo instalado, puede ver piezas y ensamblajes y rotarlos en una vista 3D.

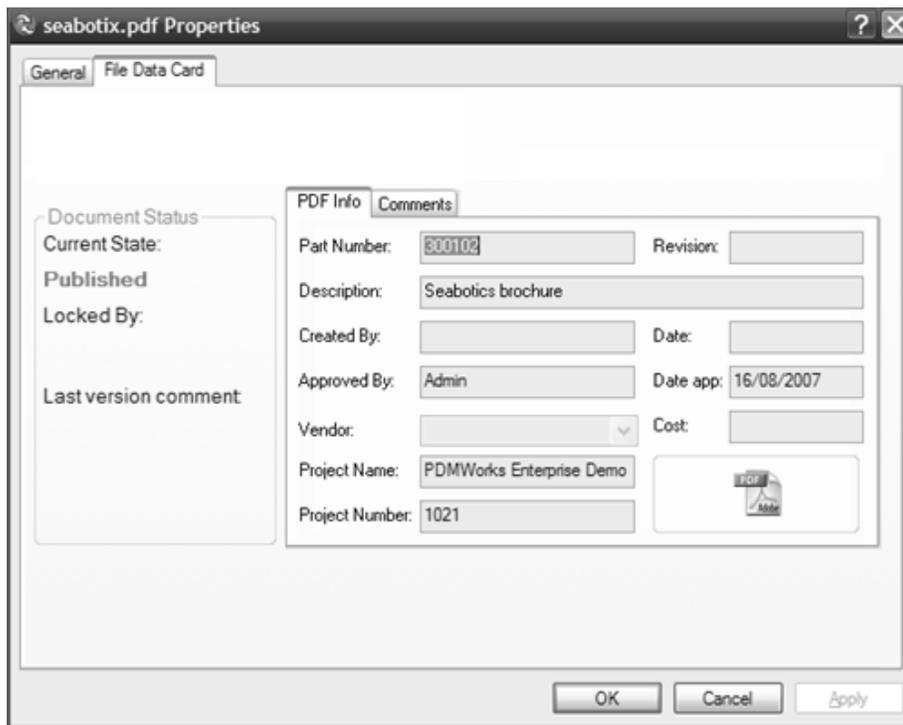


Fig.E2. Información de cada una de las piezas empleadas.

Puede generar numeraciones automáticas para documentos o campos individuales. También secuencias de textos y números pueden ser creadas como para completar campos.

Los archivos pueden almacenarse, registrarse y utilizarse en flujos de trabajo, etc. sin la necesidad de una integración especial.

Se puede definir o limitar en una lista, los datos que un usuario puede seleccionar para completar los campos de datos. Estas listas pueden ser sencillas de texto o variables de búsqueda de la base de datos SQL. Las referencias entre documentos pueden ser creadas por usuarios si uno de ellos tiene relación con otro. Por ejemplo si un cierto estándar se aplica a una pieza, entonces puede ser vinculado como una referencia para esa pieza específica. Estos vínculos pueden ser vistos a medida que el usuario los va definiendo.

Plantillas

Con Windows y aplicaciones Office hay un potencial grande para automatizar tareas de oficina. Utilizando plantillas y una buena estructura de almacenamiento se lograría tener una gestión bien fundada de todos los documentos. El gran desafío es que los usuarios tienen que trabajar bajo procedimientos estrictos para conservar todo bien organizado.

Con PDM la empresa podrá brindarles a todos los usuarios un juego completo de plantillas para generar nuevos documentos para que siempre sean utilizados los estándares de la empresa.

De acuerdo a lo citado anteriormente un usuario puede seleccionar una plantilla con un clic de ratón

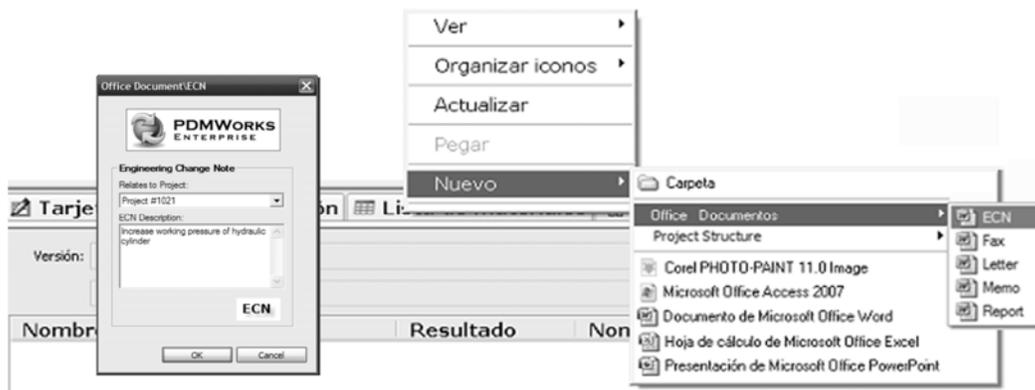


Fig.E3. Generación de nuevos documentos.

de la misma forma que él lo haría con el método común de Windows Explorer.

PDM le pedirá al usuario que rellene los campos con los datos requeridos para ese documento. El nombre de archivo y la ubicación puede ser controlado por PDM para asegurar un almacenamiento coherente del documento. Dependiendo del rol del usuario (por ejemplo el departamento), diferentes juegos de plantillas serán mostrados en el menú. Un rasgo poderoso de la plantilla es que también la información acerca de documentos relacionados puede ser usada en otro de ellos. Acompañando a esto se logra definir una plantilla que da una lista de documentos relevantes de un proyecto. Si los adicionales son adjuntos, entonces el principal estará actualizado automáticamente.

Integración SolidWorks

Siendo un producto de SolidWorks, Enterprise PDM soporta las funciones y opciones de ese software. Desde la interface de usuario se acceden a la mayoría de las funciones de SolidWorks Enterprise PDM y además se visualiza en el panel de tareas el estado de disponibilidad de accesos y herramientas. SolidWorks Enterprise PDM soporta las configuraciones de SolidWorks como así también las Propiedades específicas de las configuraciones. Estos pueden ser usados en el bloque del título o BOM y en los datos de Listas de Materiales. Los cambios en el estado y en el ciclo de vida de documentos automáticamente los bloquea o libera a los archivos en SolidWorks, aún cuando el archivo está todavía abierto.

Si un usuario toma un archivo éste cambia de acceso de escritura a solo lectura por el tiempo que lo estén utilizando. Este rasgo es único para SolidWorks.

En el dibujo las propiedades de SolidWorks Enterprise PDM pueden ser fácilmente vinculadas a una nota en el formato de la hoja. Los campos serán actualizados automáticamente si los datos varían. SolidWorks Enterprise PDM puede reconocer la estructura del documento de SolidWorks (referencias



Fig.E6. Dibujo de la pieza de trabajo.



Fig.E7. Lista de elementos.

externas). Por eso los usuarios pueden inspeccionar dónde y en que momento es utilizada la información. La composición de un ensamblaje en cualquier revisión previa puede ser vista y recuperada. Las versiones más viejas de piezas, los ensamblajes y los dibujos pueden usarse para comparación. Los comentarios de revisión y los campos pueden ser impresos en el dibujo.

Integración con AutoCAD

Para manejar dibujos existentes y nuevos DWG una integración entre DWG y SolidWorks Enterprise PDM está disponible. Esto da a los usuarios el permiso de utilizar dibujos DWG en el mismo ambiente que los documentos SolidWorks y ofrece un camino para la transición muy fácil de 2D para 3D.

Características de la integración ACAD para SolidWorks Enterprise PDM:

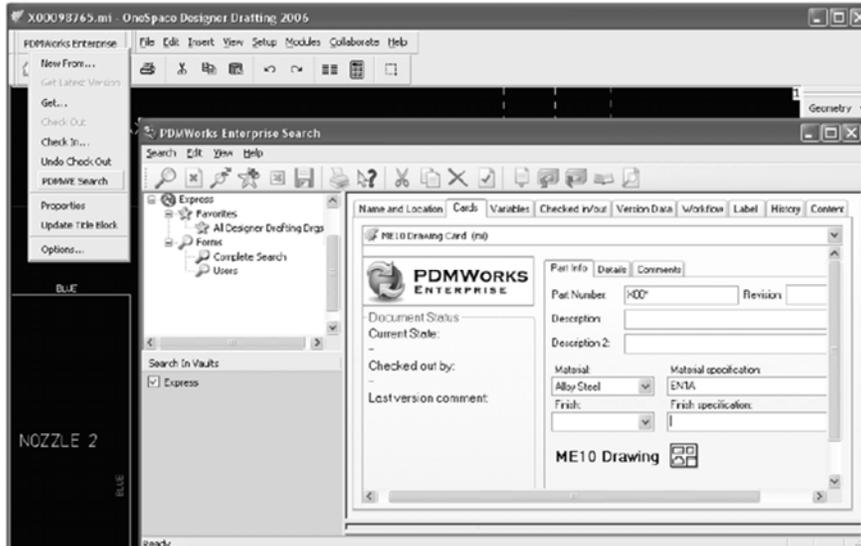


Fig.E8. Acceso a los archivos del PDM.

- La barra de herramientas de SolidWorks Enterprise PDM dentro de la sesión ACAD.
- Visualización y edición de archivos ACAD.
- Apertura y registro de documentos ACAD.
- Revisión y la gestión de la Edición de documentos ACAD.
- Workflow Configurable para ACAD.
- La gestión automática de bloques de títulos.
- Amplia capacidad de búsqueda desde ACAD.

LDM (BOM) – Lista de Materiales.

PDM tiene capacidad para crear, editar y ver Listas de Materiales. Para esa lista la estructura del documento es tomada de una base de datos donde los usuarios con los correspondientes derechos pueden añadir, quitar o exportar las LDM.

Un único rasgo que por medio de metadatos posibilita revisar campos del documento dentro del editor LDM. La LDM modificada puede salvarse, revisionarse y puede estar vinculada a un workflow. Este LDM contiene información que puede ser exportada a un ERP. También permite exportar directamente a Excel para hacer toda clase de cálculos y manipulaciones.

Intercambio de datos con un ERP

PDM tiene capacidades para configurar la importación/exportación a un ERP. En muchos casos el intercambio de datos entre SolidWorks Enterprise PDM y ERP puede lograrse sin programación específica de parte de PDM. Puede exportar archivos del texto (XML) con contenido del configurable. Si el sistema ERP no puede trabajar con XML entonces puede ser traducido en cualquier otro formato. En la mayoría de los casos éste será formato CSV.

Para importar datos del ERP los mismos Alias puede usarse para procesar archivos desde ERP. La

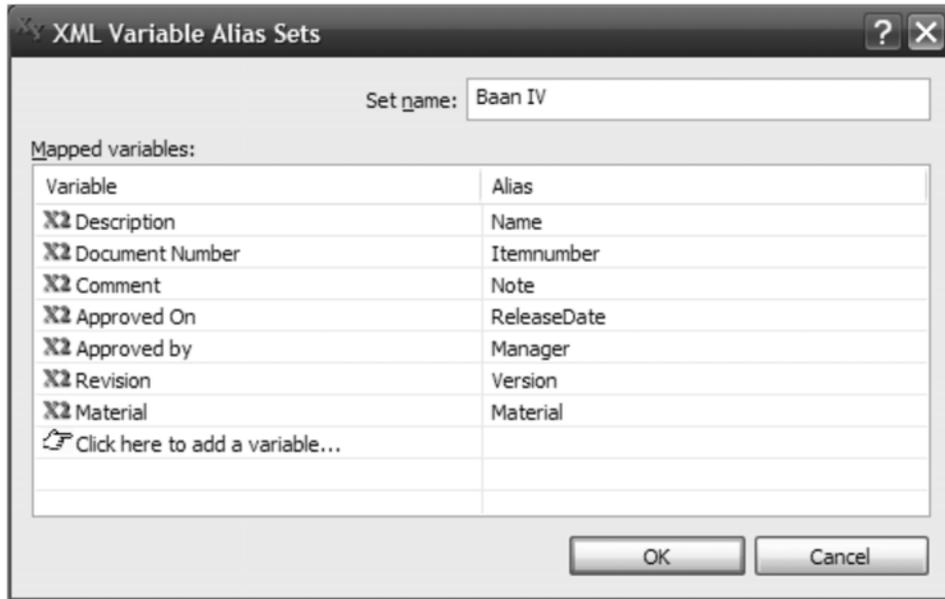


Fig.E9. Lista de variables y alias para vincular a ERP.

información de este archivo de exportación es tramitada por PDM para actualizar campos en la base de datos PDM. Así se logra que ERP relacione campos en PDM como costos, estado del almacén, proveedor, etc.

Replicación entre servidores.

Una funcionalidad estándar de PDM es la réplica de almacenes de documentos. Esto posibilita trabajar con múltiples ubicaciones, siempre sobre los mismos datos. A pesar de esto permite tener diferencias entre documentos creados en posiciones diferentes posibilitando en estos casos diferentes flujos de trabajo para archivos creados en otro sitio.

PDM emplea un servidor de datos y otro de archivos para alojar los datos centrales de los mismos y de actividades en una bóveda de almacén (vault).

Cuando un usuario se conecta a la bóveda de archivos de PDM a través de visualizadores, buscadores de archivos o tarjetas de datos se inicia un intercambio de información entre usuario y servidor de la base de datos. Cuando un usuario realiza la apertura de archivos guardados en la bóveda de almacén (vault) como, por ejemplo, dibujos y documentos, estos archivos son enviados desde el servidor de archivo al usuario. El tiempo que lleve la transferencia depende del tamaño y la velocidad de red.

En un ambiente LAN, sin PDM, los archivos son transferidos rápidamente desde el servidor, la carpeta de almacén de archivos es compartida entre múltiples oficinas sobre una conexión WAN, entonces la velocidad de transferencia decrecerá y dependerá casi con exclusividad de la velocidad de conexión, pero con gran importancia también de la cantidad de usuarios utilizándola. Podemos hablar de tiempos

Grupo Diseño, Gestión y Desarrollo de Nuevos Productos

variables, entre minutos hasta horas, en función del tamaño de archivo.

Utilizando la función de Réplica que incluye PDM puede balancear la cantidad de datos intercambiados sobre una conexión lenta WAN con la utilización de servidores de archivos en cada oficina. Cuando los usuarios trabajan en la bóveda de archivos la información aún es enviada desde el servidor central de la base de datos pero los archivos físicos son ahora tomados del servidor local de cada lugar.

Esta réplica de servidores es programada desde PDM para que sea ejecutada en períodos de baja utilización de la red WAN. De este modo se logra que todos los usuarios que utilizan documentos tengan la certeza que están haciéndolo con el último almacenado y no con versiones antiguas.

Tareas Automatizadas.

Tareas repetitivas pueden ser programadas para un procedimiento de ejecución automático.

Ejemplos de ello:

- Creación automática de documentos PDF cuando se almacena un dibujo.
- Creación automática de archivos DXF/DWG para piezas de chapa metálica desarrolladas (para corte).

Publicación de datos fuera de la Empresa.

Con PDM se puede dar acceso a usuarios externos través de la web. Esto requiere que esa persona tenga una cuenta PDM y a través de ella entrar en la bóveda PDM. Este usuario externo sólo podrá acceder a documentos según los derechos que se les haya asignado. Básicamente esto es útil para proveedores externos de diseño y/o simulaciones contratados. Para proveedores, una forma más adecuada para dar vía de entrada a los datos es crear un sitio Web sencillo y publicar los datos necesarios en un DMZ (zona segura sin acceso directo a la base de datos de archivos). Funcionará más o menos como un servidor ftp pero con aplicaciones más específicas para el usuario. Para mantener informados a estos proveedores externos la mejor forma es dejar que un workflow envíe un correo a una lista de direcciones de correo electrónico cuando un cierto documento es actualizado.

ANEXO F: Ejemplos de implementación de PLM

En este anexo se describen ejemplos de distintos casos de implantación de sistemas PLM en pequeñas y medianas empresas agrupadas por el sector al que pertenecen.

A) AUSA → www.ausa.es

Ausa produce vehículos industriales compactos. Implantó un sistema PLM el año 1999 coincidiendo con una reorganización estratégica que potenciaba el I+D. Al cabo de tres años había alcanzado los siguientes objetivos:

- Aumento del 52,5% del tiempo efectivo de diseño mediante la eliminación de tareas improductivas.
- Significativa reducción de costes de no-calidad.
- Capacidad de involucrar a los proveedores en los proyectos de diseño.
- Disminución del “time to market” en un 29%.
- Aumento de 2 a 4 del número de nuevos vehículos introducidos por año. Porcentaje de facturación de los productos introducidos en los últimos 5 años: 50,57%.

El modelo CH150 fue el primer vehículo diseñado en el nuevo entorno PLM y ha ganado varios galardones internacionales.

B) VOLPAK → www.volpak.com

Volpak diseña y fabrica maquinaria dedicada al sector del envase y el embalaje.

Motivaciones para implantar un sistema PLM.

Hacer reutilizables los conocimientos de las personas de la compañía integrándolos en un sistema accesible para todos.

Antes la información estaba dispersa por toda una serie de directorios. Actualmente está clasificada y estructurada de tal manera que es muy fácil encontrarla y cualquiera lo puede hacer.

Resultados obtenidos

- Reducción de errores y del 9,8% del tiempo en el proceso de diseño.
- Incremento del aprovechamiento de los diseños hechos en proyectos anteriores originando una reducción del 11% en el valor del inventario.
- Reducción del 25% en el tiempo de creación de estructuras y listas de materiales.

C) ENSA, Equipos Nucleares S.A. → www.ensa.es

ENSA es uno de los principales suministradores de componentes primarios y servicios para la industria nuclear. Produce, entre otros, generadores de vapor, vasijas y cabezas para reactores, así como contenedores para el transporte almacenamiento de residuos.

Motivaciones para implantar un sistema PLM.

En sus proyectos ENSA gestiona cientos de documentos cuyo control es crítico en todo el proceso. El sistema existente, basado en papel, y los procesos de gestión asociados eran difíciles, costosos y presentaban numerosos inconvenientes. ENSA se planteó inicialmente la implantación de un sistema de

Grupo Diseño, Gestión y Desarrollo de Nuevos Productos

pura gestión documental pero al conocer las posibilidades del PLM decidió dar un paso más. Decidió establecer un PLM para gestionar también las estructuras de producto y vincularlas con los documentos y otros programas de gestión. PLM era una solución escalable que permitiría a ENSA adaptarse mejor a las nuevas exigencias del mercado.

El alcance del proyecto.

El sistema es usado por 150 de las 400 personas de la plantilla en los departamentos de Ingeniería, Fabricación, Tecnología, Aprovisionamientos, Calidad, Servicios, Proyectos y Comercial. Con él se gestionan más de 16.000 documentos al año, de 65 clases distintas, en un contexto de más de 50 proyectos. También se ha integrado con los sistemas informáticos ERP -para la transferencia de listas de materiales-, Planificación, Compras, Calidad y Producción con los cuales se intercambia documentos y estados de los procesos.

El sistema se implementó en dos fases. La primera duró 9 meses y al finalizar la misma ya se gestionaban todos los documentos, flujos de trabajo y la integración con los otros sistemas. La segunda fase tuvo como objeto la gestión de las estructuras y listas de materiales y se implementó en 4 meses. Al iniciarse la instauración el equipo de proyecto procedió a un exhaustivo análisis de los procesos existentes y a una redefinición y normalización de los mismos y de la información a gestionar.

Resultados obtenidos

- Acceso en tiempo real a la documentación.
- Visibilidad online del estatus de los documentos.
- Distribución electrónica e instantánea de los documentos.
- Gestión segura de las revisiones.
- Agilización de los workflows de aprobación.
- Gestión ágil de la Estructura de productos.
- Unificación de reglas de gestión y formatos.
- Reducción del uso y consumo de papel.
- Eliminación de tareas sin valor añadido.

D) Merak → www.merak.es

Merak es una pequeña empresa dedicada al diseño de equipos electrónicos en el entorno del sector del transporte vertical.

Motivaciones para implantar un sistema PLM

De acuerdo con el plan estratégico de mejora de la calidad de procesos el departamento de I+D+i de Merak implantó un sistema PLM para la gestión de los proyectos y sus documentos.

Resultados obtenidos

- Organización más efectiva del trabajo en grupo, tanto dentro del departamento de I+D+i como con las otras secciones.
- Notable ahorro del tiempo en la gestión documental.
- Mejora en la accesibilidad de la información. Más del 60% de las consultas se hacen directamente sobre el sistema PLM sin tener que pedir los datos a ninguna otra persona.
- Disminución del 80% de los errores asociados a envíos de documentación a proveedores gracias a una gestión de los documentos de CAD eléctrico y la creación automática de listas de compra.

ANEXO G: Estructura de producto

A continuación desarrollaremos un ejemplo de **Esquema de Producto** orientado a una fábrica de pequeños motores eléctricos. Para realizar esta tarea nos basaremos en lo dicho en el punto 10.5.1 y utilizaremos los mismos niveles de integración establecidos en dicho apartado.

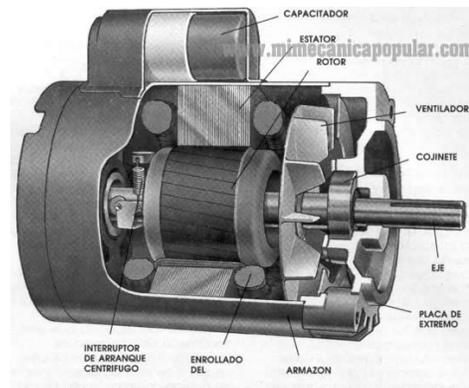
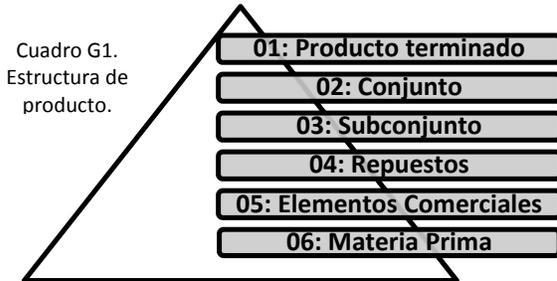


Fig.G1. Producto a analizar.

El **producto terminado** está dado por el motor completo. En lo que concierne a **conjuntos** tomaremos el conformado por los elementos internos de la carcasa y el formado por la misma y elementos externos. Por último tomaremos como **subconjuntos** a las partes mecánicas y eléctricas en el primer conjunto y al rotor y estator en el segundo.

Para leer el esquema de producto se realiza la lectura desde el nivel más alto (01) hacia los siguientes. De este modo tendremos:

Tabla G1. Estructura de producto desarrollada.

Nivel de integración		Identificación	Unidades	Descripción
01		20.9.33256	1	Motor terminado
	02	21.9.12034	1	Conjunto interior
		03	22.3.15032	Subconjunto Rotor
			04	Eje
			06: Acero SAE XXXX.....	0.5 Kg (Tipo de material)
			04	23.5.26555 "Jaula de ardilla"
			06: Chapa negra.....	0.4Kg (Tipo de material)
			05	23.6.23365 Ventilador
			05	23.4.46932 Rodamientos
		03	22.9.13553	Subconjunto estator
			04	23.7.66591 Paquete Estator
			06: Chapa negra.....	1.9 Kg (Tipo de material)
			04	23.8.35669 Bobinado

Grupo Diseño, Gestión y Desarrollo de Nuevos Productos

				06: Alambre cobre.....	2.3 Kg	(Tipo de material)
	02			21.9.65810	1	Conjunto Exterior
		03		22.9.86462	1	Subconjunto partes mec.
			04	23.8.65934	1	Carcasa exterior
				06: Aluminio XXXX.....	3 Kg	(Tipo de material)
			05	23.4.86846	4	Tornillos
		03		22.9.81661	1	Subconjunto partes ele.
			05	23.8.26444	1	Capacitor
			05	23.8.91213	1	Cable y conector

ANEXO H: Proyecto RepRap

RepRap es la primera máquina auto-replicante de uso general de la humanidad. Tiene la forma de una impresora 3D libre capaz de imprimir objetos plásticos. Como muchas de las partes de ésta están hechas de plástico, RepRap imprime esas partes y puede auto-replicarse haciendo un kit de sí misma de manera que cualquier persona la puede ensamblar si cuenta con el tiempo y los materiales. Esto también significa que si usted tiene un RepRap usted puede imprimir un sinfín de cosas útiles.

El proyecto RepRap es una iniciativa concebida con el propósito de crear una máquina de prototipado rápido libre que sea capaz de replicarse a sí misma. Una máquina de este tipo puede fabricar objetos físicos a partir de modelos generados por sistemas CAD 3D e imprimirlos a base de plástico. El proyecto RepRap fue iniciado en febrero del 2004 por Andrian Bowyer en Inglaterra pero actualmente hay personas colaborando en otras partes del mundo.

RepRap está disponible bajo la licencia GNU GPL. Esta licencia permite que podamos copiar, estudiar, distribuir y mejorar sus diseños y código fuente. Tomando como una analogía la Teoría de Evolución de Darwin la comunidad que trabaja alrededor del proyecto puede mejorar los diseños actuales permitiendo que la máquina evolucione con el tiempo.

El RepRap requiere de ensamblaje. Es allí donde entra en una relación simbiótica con el hombre muy similar a la relación entre flores y abejas: la máquina sería la primera y el humano la segunda. Produce objetos para el hombre así como la flor produce néctar para las abejas y a cambio esa persona ayudará a RepRap a ensamblar sus partes y así reproducirse tal como ese insecto lleva el polen a otra flor con el mismo objeto.

Entonces, si el proyecto tiene éxito, estaríamos hablando que en cada casa o centro comunitario existiría un RepRap. Sólo sería necesario descargar de Internet el diseño del objeto que deseamos (o pagar a alguien para que lo haga) y la máquina lo construirá.

A nivel económico/social RepRap plantea grandes cambios: menos fábricas, menos necesidad de transporte de bienes, menos necesidad de dinero, más autonomía, más desarrollos tecnológicos locales, etc.

En los 70's acceder a un computador era exclusivo y limitado, ahora no lo es. Es así como RepRap plantea un nuevo modelo de fabricación para todos, una fábrica que puede hacer más fábricas.

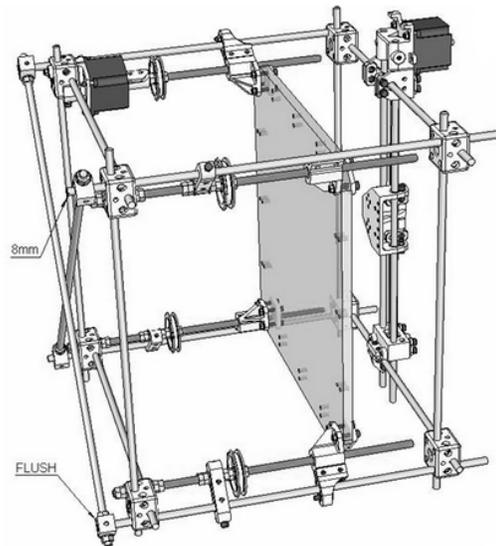


Fig.H1. Máquina de prototipado RepRap.

ANEXO I: Prototipado en sistema FDM

Para poder realizar un prototipo en el sistema FDM a partir de un diseño de CAD debemos contar con los programas:

- **Solidworks:** éste es el soporte CAD donde realizamos el diseño y modelamos la pieza.
- **Netfabb:** es un programa sencillo pero potente y con muchas prestaciones que permite editar las piezas en formato *.stl*.
- **Axon:** este programa convierte a los archivos de piezas del formato *.stl* a *.bfb*, que es el que la maquina interpreta. Este programa permite también editar las piezas en formato *.stl* pero no tiene las cualidades del Netfabb el cual, a su vez, no permite guardar el archivo en *.bfb*.

Los pasos para realizar el prototipado en el sistema FDM desde su diseño hasta su obtención se puede resumir del siguiente modo:

- 1) Realizamos el diseño en el programa CAD.
- 2) Finalizado el diseño, el archivo se guarda en formato *.stl* definiendo previamente la calidad entre las opciones de guardado.
- 3) Abrimos el archivo *.stl* de nuestra pieza en Netfabb y se nos abrirá la pieza en una posición cualquiera.
- 4) Si al abrir el archivo aparece, en el costado derecho-inferior, un símbolo de admiración en rojo, éste nos indica que la pieza tiene errores. Para repararlo debemos clicar la cruz roja que está en la parte derecha-superior y seleccionar la opción *"Automatic Repair"* y la ejecutamos.
- 5) Una vez que el programa termina el proceso debemos hacer clic en el botón *"Apply Repair"* que se encuentra en la misma ventana que *"Automatic Repair"*. De lo contrario los problemas no se solucionarían.
- 6) Ya reparada, divisamos la mesa de trabajo en el ordenador, vamos a *"Settings/Settings"* y configuramos los valores del tamaño máximo admisible de la pieza para nuestra máquina. En el caso de la maquina instalada en la UTN las medidas son 275 x 230 x 210.
- 7) Comprobamos el tamaño de la pieza, la cual podemos cortar, trasladar, escalar, rotar, etc. de manera que entre dentro de la zona de trabajo delimitada por las boquillas y la mesa.
- 8) Editada la pieza se guarda en formato *.stl*.
- 9) Se procede a abrir el programa Axon y configurar los datos de la siguiente manera:
 - **Printer Type** (Tipo de impresora): 3D Touch / BFB-3000 bed V2 black
 - **Extruders** (Extrusores): 2
 - **Extruder 1Material** (Material extrusor 1): ABS White (material pieza)
 - **Extruder 2Material** (Material Extrusor 2): PLA red traslucent (material de soporte)
- 10) Luego de la configuración aparece, en la pantalla, la mesa de trabajo de la impresora y procedemos a abrir el archivo de la pieza y la acomodamos en la base.
- 11) El siguiente paso consiste en generar el archivo para que la maquina lo interprete. Para ello vamos al botón *"Build"* y configuramos lo siguiente:
 - **Build style profile** (Estilo de perfil): establece el perfil de impresión. Por lo general se deja seleccionada la opción *"default"*.
 - **Layer thickness** (Espesor de capa): determina el espesor por capa. Para piezas sin mucho detalle se utiliza 0.5 o 0.25 y para mayor precisión se usa 0.125.
 - **Raft Material** (Material de base): material de la capa sobre la que comenzará a imprimir la pieza (conviene que sea del mismo material que la misma).

Grupo Diseño, Gestión y Desarrollo de Nuevos Productos

- **Support Material** (Material de soporte): permite elegir el material de los soportes para voladizos o ángulos mayores a 60°.
 - **Part Material** (Parte Material): aquí seleccionamos el material de la pieza.
 - **Fill Density** (Densidad del filamento): lo recomendado es 40%.
 - **Fill Pattern** (Patrón de relleno): es el patrón con que la máquina rellena la pieza (rayado, cuadrículado, paneles, círculos).
 - **Speed Multiplier** (Multiplicador de velocidad): permite aumentar la rapidez de impresión a costas de la calidad.
 - **Advance settings** (Configuración avanzada): se pueden poner la cantidad de pieles o *skins* extra que la máquina realizará antes de empezar a rellenar la pieza.
- 12) Cuando se termina la configuración se *clickea* al botón “*Built*” y comienza un procesamiento de la pieza que, al finalizar, da a conocer datos como el tiempo de trabajo, el precio, el volumen de material usado, el peso, etc.
 - 13) El siguiente paso consiste en guardar el archivo bajo el formato **.bfb** y copiarlo en la raíz de un pendrive para poder llevarlo a la máquina de prototipado.
 - 14) Por último conectamos el dispositivo de memoria a la impresora 3D, abrimos el archivo de la pieza y le damos imprimir en el panel del sistema.

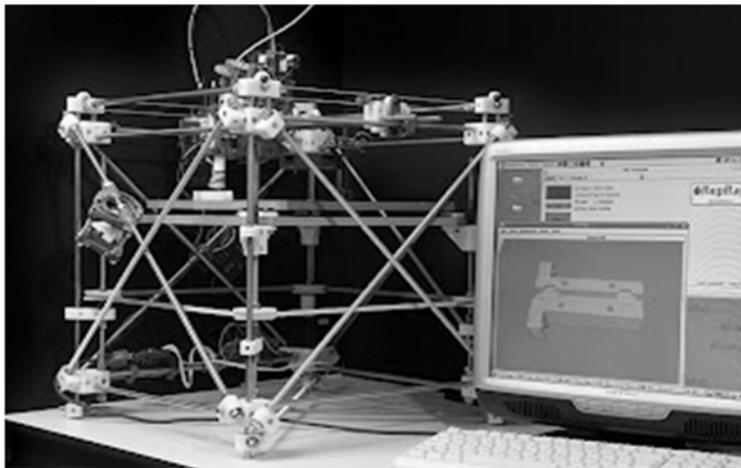


Fig.11. Máquina de FDM junto con el soporte CAD.

BIBLIOGRAFÍA**CAD**

- [1] “Diseño Asistido Por Computadora (CAD)”. Arreola, 1 de Febrero de 2010 [Consultado el 15 de Mayo de 2013]. Disponible en <<http://le0el.wordpress.com/2010/02/01/disenio-asistido-por-computadora-cad/>>
- [2] <http://es.wikipedia.org>
- [3] Omar Villaverde “Comandos Básicos de AutoCAD” [En línea], 28 de Abril de 2011 [Consultado el 5 de Mayo de 2013]. Disponible en <http://comandosautocad.wordpress.com/2011/04/28/comandos-autocad/>
- [4] “Introducción a SolidWorks Eléctrico”, El Blog CAPINC - Tutoriales de SolidWorks y Stratasys, 8 de Agosto de 2012 [Consultado el 13 de Abril de 2013]. Disponible en <<http://blog.capinc.com/2012/08/introduction-to-solidworks-electrical/>>
- [5] “SolidWorks Electrical” [En línea] SolidWorks [Consultado el 23 de Marzo de 2013] Disponible en <<http://www.solidworks.es/sw/products/solidworks-electrical.htm>>
- [6] Manual Técnico SolidWorks “Conceptos básicos de SolidWorks - Training”; 2013; [Consultado el 30 de Marzo de 2013].
- [7] Manual Técnico SolidWorks Electrical “SolidWorks Electrical 2D - Training”; 2013; [Consultado el 15 de Abril de 2013].
- [8] Manual Técnico SolidWorks Electrical “SolidWorks Electrical 3D - Training”; 2013; [Consultado el 15 de Abril de 2013].

ECODISEÑO

- [9] “SolidWorks Sustainability” [En línea] SolidWorks [Consultado el 23 de Marzo de 2013] Disponible en <http://www.solidworks.es/launch/documents/SW_Sustainability_DS_2013_ESP.pdf>
- [10] “Ecodiseño” [En línea], [Consultado el 23 de Marzo de 2013]. Disponible en <<http://www2.uca.es/grup-invest/cit/Eco-diseno.htm>>

CAM

- [11] “Sistemas CAD/CAM (CAM)”, [En línea] [Consultado el 30 de Marzo de 2013]. Disponible en <http://ocw.unizar.es/enseanzas-tecnicas/fabricacion-integrada-por-ordenador-curso-preparatorio/Materiales/fio_6_sistemas_cad_cam_ii.pdf>
- [12] “CAM/Manufactura Asistida por Computadora” [En línea]. Siemens Industry Software. [Consultado el 02 de Marzo 2013]. Disponible en <http://www.plm.automation.siemens.com/es_sa/plm/cam.shtml>
- [13] <http://es.wikipedia.org>
- [14] Laboratorio de Control Numérico de H.M. “El control numérico de las máquinas herramientas” [En línea], UTN Facultad Regional La Plata. [Consultdo el 20 de Mayo de 2013]. Disponible en <<http://www.frlp.utn.edu.ar/mecanica/Materias/CNCMH/ClaseDemo.PDF>>

Grupo Diseño, Gestión y Desarrollo de Nuevos Productos

- [15] “Control Numérico Computarizado” Blog Web [En Línea], 04 de Julio de 2009 [Consultado el 18 de Mayo de 2013]. Disponible en <<http://cnc-ipm.blogspot.com.ar/2009/07/ventajas-y-desventajas.html>>
- [16] “MASTERCAM”, [En línea] [Consultado el 30 de Marzo de 2013]. Disponible en <<http://www.mastercam.com/>>

CAD/CAM

- [17] “Introducción al CAD/CAM”, [En línea] [Consultado el 05 de Mayo de 2013]. Disponible en http://www.virtual.unal.edu.co/cursos/ingenieria/mecatronica/docs_curso/Anexos/TUTORIALcnc/DOCUMENTOS/TEORIA/INTRODUCCION%20AL%20CAD-CAM/01%20Introduccion%20CAD%20CAM.pdf >
- [18] "La automatización del diseño: Manufactura Asistida por Computadora CAM", [En línea] [Consultado el 05 de Mayo de 2013]. Disponible en <<http://www.cadcam.com.ve/Manuales%20Generales/cadcam.pdf>>

CAE

- [19] “CAE/Ingeniería Asistida por Computadora” [En línea]. Siemens Industry Software. [Consultado el 02 de Marzo 2013]. Disponible en http://www.plm.automation.siemens.com/es_sa/plm/cae.shtml
- [20] “El dibujo asistido por computación”, [En línea]. Siemens Industry Software. [Consultado el 07 de Abril 2013]. Disponible en <http://ar.kalipedia.com/tecnologia/tema/graficos-funcionamiento-sistema-cae.html?x1=20070822klpingtcn_72.Ees&x=20070822klpingtcn_169.Kes>

MEF

- [21] Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias (Versión On-line ISSN 2071-0054): “Análisis de neumático por elementos finitos con vistas a la determinación de coeficientes de cargas dinámicas en estructuras de máquinas agrícolas”, Universidad Agraria de la Habana [Oct-Dic 2011], [Consultado el 25 de Mayo 2013]. Disponible en <http://scielo.sld.cu/scielo.php?pid=S2071-00542010000400003&script=sci_arttext>
- [22] <http://es.wikipedia.org>
- [23] “Métodos de los Elementos Finitos para Análisis Estructural”, [En Línea]. [Consultado el 30 de Mayo 2013]. Disponible en <[http://www.unav.es/adi/UserFiles/File/4000002130/Elementos%20Finitos\(2\).pdf](http://www.unav.es/adi/UserFiles/File/4000002130/Elementos%20Finitos(2).pdf)>
- [24] Gerardo Franck “Sistemas CAE-FEM”, 6 de Septiembre de 2012 [Consultado el 5 de Junio 2013].

CIM

- [25] Ing. Ricardo Jiménez “Manufactura Integrada por Computadora” [En línea] [Consultado el 15 de Mayo de 2013]. Disponible en <<http://materias.fi.uba.ar/7565/U1-Manufactura-Integrada-por-Computadora.pdf>>
- [26] “CIM – Definición” Blog Web [En línea], 03 de Julio de 2009 [Consultado el 26 de Marzo de 2013]. Disponible en <<http://msalazar-ingeniero.blogspot.com.ar/>>

CAPP

[27] M^a Luisa G-Romeu de Luna, “Evolución de los Sistemas Asistidos para la Planificación de Procesos”. Dpto. de Ing. Mecánica y de la Construcción Industrial, Universidad de Girona [Consultado el 30 de Mayo de 2013]. Disponible en <<http://www.unizar.es/aeipro/finder/INGENIERIA%20DE%20PRODUCTOS/BF05..htm>>

[28] Martí Casadesús, Rodolfo De Castro, Gerusa Giménez, “Planteamiento de la estructura para el diseño de un DSS para la planificación de los procesos productivos CAPP”, Dpto. de Ing. Industrial [Consultado el 23 de Mayo de 2013]. Disponible en <<http://eps.udg.es/oe/webmarti/Planteamiento%20CAPP.pdf>>

PDM

[29] “PDM/ Gestión de Datos de Producto” [En línea]. Siemens Industry Software. [Consultado el 02 de Marzo 2013]. Disponible en http://www.plm.automation.siemens.com/es_es/plm/pdm.shtml

PLM

[30] “Product Lifecycle Management (PLM)”. PDXpert PLM software for growing companies, 12 Septiembre 2012 [Consultado 15 Marzo 2013]. Disponible en <<http://www.product-lifecycle-management.com>>

[31] “Product Data Management Software”. Epicor Software Corporation [Consultado 10 Junio 2013]. Disponible en <<http://www.epicor.com/Solutions/Pages/ProductDataManagement.aspx>>

[32] José Alcántara, “¿Qué es un ERP? (Enterprise Resource Planning para Linux)”, 27 de Noviembre de 2007 [Consultado el 15 de Marzo de 2013]. Disponible en <<http://www.versvs.net/anotacion/que-es-un-erp-enterprise-resource-planning-linux>>

[33] “SAP PLM: GESTIÓN EFECTIVA DE LA PRODUCCIÓN Y DESARROLLO DE PRODUCTOS Y SERVICIOS.”. SAP Business Suite [Consultado el 30 de Mayo de 2013]. Disponible en <<http://www.sap.com/spain/solutions/business-suite/plm/index.epx>>

[34] “Product Lifecycle Management (PLM)” [En línea]. ENOVIA SmarTeam. [Consultado el 15 de Marzo de 2013]. Disponible en <<http://razorleaf.com/solutions/software/enovia-smarteam/>>

[35] “Qué es PLM Software?” [En línea]. Siemens Industry Software. [Consultado el 02 de Marzo 2013]. Disponible en <http://www.plm.automation.siemens.com/es_es/plm/>

MRP

[36] “MRP I” [En línea] [Consultado el 10 de Junio de 2013]. Disponible en <http://members.tripod.com/el_mrp/mrp1.htm>

[37] <http://es.wikipedia.org>

[38] “MRP II” Blog Web Taringa!, 2010 [Consultado el 15 de Marzo de 2013]. Disponible en <<http://www.taringa.net/posts/economia-negocios/3803269/MRP-II.html>>

ERP

[39] <http://es.wikipedia.org>

[40] “¿Qué es un sistema erp?”, BnextERP [En línea] [Consultado el 20 de abril de 2013]. Disponible en <<http://blocknetworks.com.mx/bnext/?q=node/51>>

[41] Ricardo Montaña Badilla “Sistema ERP. Definición, funcionamiento, ventajas y desventajas”, 10 de Febrero de 2012 [Consultado el 20 de Marzo de 2013]. Disponible en <

Grupo Diseño, Gestión y Desarrollo de Nuevos Productos

<http://www.gestiopolis.com/administracion-estrategia/erp-definicion-funcionamiento-ventajas-desventajas.htm>>

- [42] Silvana Gerometta “¿Qué es un software ERP?” Revista Industria y Química Nº 356 [En línea] [Consultado el 19 de Abril de 2013]. Disponible en <
<http://www.aqa.org.ar/iyq356/GenteyEmpresas356.pdf>>

SISTEMAS DE PROTOTIPADO RÁPIDO e INGENIERÍA INVERSA

- [43] José Antonio Alonso Rodríguez, “Sistemas de Prototipado Rápido” [En Línea]. Disponible en <
<http://webs.uvigo.es/disenoindustrial/docs/protorapid.pdf>>
- [44] Jorge Ceballos, “El Futuro de las manufacturas”. INTI/Programa de diseño. Publicado en boletín informativo Nº 137. Fecha 01/07/2009. Disponible en <
<http://www.inti.gov.ar>>
- [45] “Proyecto RepRap”, [En línea]. Disponible en <
http://es.wikipedia.org/wiki/Proyecto_RepRap>
- [46] “Para qué sirve el Prototipado Rápido” [En línea]. Disponible en <
<http://www.protorapido.es/para.pdf>>
- [47] “Prototipado Rápido”, [En Línea]. Disponible en <
<http://www.centrotecnologicojc.org.ar>>
- [48] “FDM, una Tecnología de Prototipado Rápido” [En Línea]. Disponible en <
<http://paulinatapiad.blogspot.com.ar/>>
- [49] “Prototipado Rápido”, [En Línea]. Disponible en <
<http://www.acroprototipos.com.ar>>
- [50] “Nuevas tendencias en Tecnología”, [En Línea]. Disponible en <
<http://nuevastentecnologicas.blogspot.com.ar>>
- [51] “Custompart.net”, [En Línea]. Disponible en <
<http://www.custompartnet.com>>

Índice

CAPÍTULO I – SISTEMAS CAD -PROCESO DE DISEÑO	7
1. SISTEMAS CAD	10
1.1 Definición de sistema CAD	10
1.2 Tipos de CAD.....	11
1.3 CAD 2D/3D.....	12
1.4 Estrategias de diseño CAD.....	14
1.5 Estructura de un sistema CAD	16
1.6 Campos de aplicación.....	17
1.7 Criterios para la selección y adquisición de un sistema CAD	19
1.8 Ventajas del CAD	19
1.9 Desventajas del sistema CAD	19
1.10 Tipos de Archivos CAD y datos interesantes	20
1.11 AutoCAD	20
1.12 SolidWorks.....	23
1.13 SolidWorks Electrical	27
1.13.1 SolidWorks Electrical 2D.....	27
1.13.2 SolidWorks Electrical 3D.....	28
1.13.3 Ventajas y cualidades	28
CAPITULO II – ECODISEÑO	31
2. ECODISEÑO.....	31
2.1 Definición.....	33
2.2 Factores de impacto medioambiental	34
2.3 Características de un producto sustentable.....	35
2.4 La relatividad del diseño sostenible	35
2.5 Las tres opciones de la evaluación medioambiental.....	36
2.6 ¿Qué comparo?	36
2.7 Evaluación de ciclo de vida (LCA)	37
2.7.1 Extracción de materias primas	38
2.7.2 Procesamiento de materiales.....	38
2.7.3 Fabricación de piezas	38
2.7.4 Ensamblaje	38
2.7.5 Uso del producto.....	38

Grupo Diseño, Gestión y Desarrollo de Nuevos Productos

2.7.6 Fin de la vida útil.....	38
2.7.7 Transporte	38
2.8 Interpretación de los resultados	39
CAPÍTULO III – SISTEMAS CAM	41
3. SISTEMAS CAM	43
3.1 Definición de sistemas CAM	43
3.2 Tecnología CNC.....	43
3.2.1 Concepto de Control Numérico y CNC.	44
3.2.2 Maquinaria	44
3.2.3 Técnicas de programación CN	47
3.2.4 Ventajas y desventajas del CN y CNC	49
3.2.5 Metodología de trabajo en función de la cantidad de piezas producidas	49
3.3 Clasificación de los sistemas CAM	49
3.4 Secuencias del proceso CAM (2D)	51
3.5 Ventajas del CAM	52
3.6 Datos interesantes.....	53
3.7 Nesting.....	54
3.7.1 Descripción general	54
3.7.2 Características y limitaciones	54
3.7.3 Clasificación	55
3.7.4 Técnicas de Nesting	55
3.7.4 Tecnologías de aplicación (ver punto 2.2.2 Maquinaria)	57
3.7.5 Ventajas	58
3.8 Programación de control numérico ISO estándar (código G).....	58
3.8.1 Estructura de un programa CNC.....	58
3.8.2 Instrucciones de movimiento o preparatorias (Funciones G)	59
3.8.3 Funciones M (Auxiliares)	63
3.8.4 Análisis de algunas de las funciones G	64
3.8.5 Funciones utilizadas por los sistemas CAM	70
3.9 Sistemas WOP.....	70
CAPÍTULO IV – SISTEMAS CAD - CAM	71
4. Sistema CAD/CAM	73
4.1 Historia y evolución del CAD/CAM	73

4.2 Componentes del CAD/CAM	75
4.3 El CAD/CAM desde el punto de vista industrial.	76
CAPÍTULO V – SISTEMAS CAE	78
5. SISTEMAS CAE.....	79
5.1 Definición del sistema CAE	81
5.2 Interacción CAD/CAE	81
5.3 Beneficios del sistema CAE.....	83
5.4 Ejemplos de software CAE.....	84
5.5 Modelo de los Elementos Finitos	84
5.5.1 Resumen histórico.....	85
5.5.2 Estados del arte – MEF	86
5.5.3 Conceptos generales del método.....	87
5.5.4 Forma de aplicar el método	88
5.5.5 Tipos de análisis ingenieriles	91
5.5.6 Problemas termodinámicos sujetos a análisis por MEF.....	92
5.5.7 Ventajas y limitaciones del MEF.....	93
5.5.8 Ejemplos de aplicación	94
CAPÍTULO VI – CIM	97
6. SISTEMAS CIM	101
6.1 Concepto CIM	101
6.2 Elementos de un sistema CIM.....	102
6.3 Objetivos del CIM	102
6.4 Aspectos de manufactura y producción.....	104
6.5 Beneficios estratégicos del sistema CIM	106
CAPÍTULO VII - SISTEMAS CAPP	108
7. SISTEMA CAPP	109
7.1 Concepto de CAPP	111
7.2 Objetivos de la CAPP	111
7.3 Factores importantes y método del sistema.....	111
7.4 Enfoques de los sistemas CAPP	112
7.4.1 Enfoque manual	113
7.4.2 Enfoque variante	113
7.4.3 Enfoque generativo	113

Grupo Diseño, Gestión y Desarrollo de Nuevos Productos

7.4.4 Enfoque semigenerativo.....	114
7.4.5 Enfoque automatizado e inteligente	114
7.5 Beneficios	114
CAPÍTULO VIII – SISTEMAS PDM	115
8. SISTEMAS PDM	117
8.1 Concepto de PDM.....	117
8.2 Administración de la Información	118
8.2.1 Clasificación de Componentes.....	119
8.2.2 Clasificación de Documentos.....	119
8.2.3 Estructura del Producto.....	120
8.2.4 Buscando la Información	120
8.3 Administración de Procesos	121
8.3.1 Administración de Tareas	121
8.3.2 Administración del Flujo de Tareas	122
8.3.3 Administración de la Historia de Tareas.....	123
8.4 Beneficios del sistema PDM	125
8.4.1 La reducción del tiempo de salida al mercado	125
8.4.2 Productividad mejorada en el diseño.....	125
8.4.3 Precisión mejorada en el diseño y la manufactura	126
8.4.4 Mejor uso de las habilidades creativas del grupo	126
8.4.5 Uso comfortable	126
8.4.6 Integridad de la información garantizada	126
8.4.7 Mejor control de los proyectos	127
8.4.8 Mejor manejo de los cambios de ingeniería	127
8.5 Un gran paso hacia la Administración Total de la Calidad.....	127
CAPÍTULO IX – SISTEMAS PLM	127
9. SISTEMAS PLM	129
9.1 Concepto de PLM.....	131
9.2 Objetivos y funciones del PLM	131
9.3 Características y funciones	133
9.3.1 Arquitectura de un sistema PLM	133
9.3.2 Información gestionada.....	134
9.3.3 Fases del PLM y tecnología correspondiente	135

9.4 Innovación a partir del PLM	136
9.5 Clasificación de los sistemas PLM.....	137
9.6 Evaluación e implementación de un sistema PLM	137
9.6.1 Evaluación del sistema	137
9.6.2 Implementación de un PLM	139
9.7 Beneficios que presenta el PLM	139
CAPÍTULO X – SISTEMAS MRP	142
10. SISTEMA MRP	145
10.1 Sistema MRP I.....	145
10.1.1 Concepto MRP I.....	145
10.1.2 Objetivos	145
10.1.3 Procedimiento	145
10.1.4 Plan maestro detallado de producción (PMS).....	146
10.1.5 Lista de materiales (BOM) y Estructura de Fabricación y de Producto.....	147
10.1.6. Gestión de Stock o Estado del Inventario	148
10.2 Sistemas MRP II	148
10.2.1 Concepto de MRP II.....	148
10.2.2 Características del sistema	148
10.2.3 Niveles del MRP II.....	149
10.3 Ventajas y Desventajas generales	150
CAPÍTULO XI – SISTEMAS ERP.....	152
11. SISTEMAS ERP.....	155
11.1 Concepto de ERP	155
11.2 Objetivos	156
11.3 Características del sistema	157
11.4 Implementación	158
11.5 Ventajas y Desventajas.....	158
CAPITULO XII – PROTOTIPADO RÁPIDO	160
12. SISTEMAS DE PROTOTIPADO RÁPIDO	161
12.1 Nociones Generales.....	163
12.2 Aplicaciones del prototipado rápido	163
12.3 Fases generales de los procesos.....	164
12.4 Técnicas más difundidas de Prototipado	165

Grupo Diseño, Gestión y Desarrollo de Nuevos Productos

12.4.1. SLA: Estereolitografía	166
12.4.2 Polimerización Térmica de Líquidos	167
12.4.3. SGC: Fotopolimerización por Luz UV	167
12.4.4 FDM: Deposición de Hilo Fundido	168
12.4.5 Shape Melting.....	169
12.4.6 SPI: Inyección Solida por Impresión	170
12.4.7 SLS: Sinterización Selectiva Láser	170
12.4.8 LOM: Fabricación por Corte y Laminado	172
12.4.9 3DP: Impresión 3D.....	172
12.4.10 MJM: Thermojet	173
12.4.11 BPB: Fabricación mediante Balística de Partículas	174
12.4.12 HIS: Solidificación por Interferencia Holográfica.....	174
12.4.13 Estratoconcepción	175
12.4.14 Prototipado Virtual.....	175
12.5 Aplicaciones del PR.....	175
12.6 Ventajas generales del prototipado	177
12.7 Limitaciones del PR.....	178
CAPÍTULO XIII – INGENIERÍA INVERSA	179
13. INGENIERÍA INVERSA	181
13.1 Introducción a la Ingeniería Inversa	181
13.2 Escaner 3D	182
13.2.1 Modelos de malla de polígonos.....	183
13.2.2 Modelos de superficies.....	183
13.2.3 Modelos sólidos CAD	183
ANEXO A: Estructura de Costos aplicada al sistema productivo	185
ANEXO B: Ejemplos de Ecodiseño	187
I) Vaso plástico – Pieza simple	187
II) Juguete a baterías – Ensamblaje de Piezas	190
ANEXO C: Ejemplos de CAM	193
I) Torneado de una pieza cilíndrica – Programa de CN	193
II) Fresado – Programación del CNC	193
ANEXO D: Enfoque matemático del Método de los Elementos Finitos	201
D.1 Introducción	201

D.2 Ecuaciones generales	210
ANEXO E: Ejemplos de implementación de PDM.....	221
ANEXO F: Ejemplos de implementación de PLM.....	229
ANEXO G: Estructura de producto	231
ANEXO H: Proyecto RepRap	232
ANEXO I: Prototipado en sistema FDM	235
BIBLIOGRAFÍA	237