Comunicaciones Eléctricas

Tecnología de fabricación

Volumen 63 N° 2 1989

ALCATEL

Comunicaciones Eléctricas, revista técnica trimestral de Alcatel NV, presenta las investigaciones, los desarrollos y las realizaciones conseguidas por las compañías Alcatel en todo el mundo.
Publicada desde 1922 en versión inglesa, se edita actualmente en cuatro idiomas y su distribución es universal.

Comunicaciones Eléctricas

Volumen 63, Número 2 · 1989

Consejo Editorial

Françoise Sampermans
Relaciones Corporativas y Publicidad

Dominique de Boisseson
Alcatel Transmission

Jacques Ernest
Investigación y Tecnología

Jean-Louis Pernin
Alcatel Business Systems

Bernard Peronin
Alcatel Cables

Giorgio Poretti
Alcatel Network Engineering and Installation

Werner Schmidt
Patentes

Renaat Van Malderen
Alcatel Public Network Systems

Editores

Editor-Jefe internacional
Michael Deason, Romford

Ediciones locales
Comunicaciones Eléctricas
Antonio Soto, Madrid

Revue des Télécommunications
Catherine Camus, París

Electrical Communication
Rod Hazell, Romford

Elektrisches Nachrichtenwesen
Wolfgang Schmid, Stuttgart

Publicado en octubre de 1989
© Alcatel NV, 1989

Las direcciones de los editores se dan en la página 188

Tecnología de fabricación

78 **Presentación**

80 **De la investigación a la producción en serie**
E.-J. Duhm y A. Wielockx

86 **Aprovisionamiento y normalización de componentes**
J. M. Rice y J. van der Donk

93 **Industrialización del producto**
D. Maulay y J. Verspecht

99 **Fabricación asistida por ordenador, sistemas de fabricación flexible, y simulación**
P. Hurault, H. R. Kopa y K. Kreft

107 **Sistemas de planificación y control de fabricación**
F. Bolay, A. Waldraff y A. White

115 **Importancia y efectos de la filosofía "justo a tiempo"**
R. Aerts, P. Bech y J.-P. Le Friec

122 **Introducción a la tecnología de dispositivos de montaje superficial**
P. Meesemaecker, W. Rozumek y R. Tarrieu

130 **Estrategias de prueba**
V. S. Andersen, G. Caratti y F. Mertens

137 **Sistemas expertos para aplicaciones de fabricación y pruebas**
W. Frank y B. Sauve

145 **Fabricación electrónica de las centrales de conmutación digital Sistema 12 y Alcatel E10**
Y. Derrien, A. Fraile, W. Hartl y J. Ijsseldijk

152 **Fabricación de sistemas de comunicaciones de empresa**
G. W. Hasler

159 **Fabricación de equipo de microondas para telecomunicación**
J.-P. Chenu, G. Erdmann y H. Müller

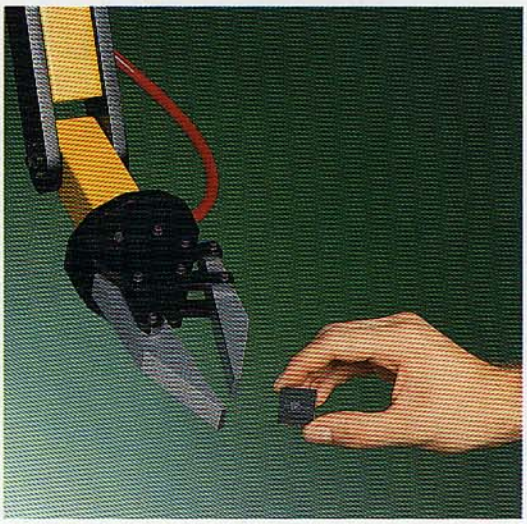
168 **Fabricación del soporte lógico**
E. Schatz y J. Wauters

176 **Fabricación de fibras ópticas para sistemas de telecomunicación**
W. Kiesewetter

183 **Concepto de calidad total**
H. Lang y B. Lefebvre

187 **En este número**

ALCATEL



A partir de la revolución industrial, se han ido transfiriendo a las máquinas muchas de las tareas de fabricación que antes realizaba personal adiestrado. Hoy en día, los sistemas de fabricación integrada por ordenador permiten que el hombre y la máquina cooperen entre sí, aportando el ordenador la información que necesitan las gentes de todas las áreas de una empresa de fabricación para tomar decisiones rápidas y eficaces. Entre sus ventajas se incluyen el acortamiento del ciclo productivo y la mejor calidad de los productos.

Presentación

El entorno de la fabricación, especialmente en la industria de las telecomunicaciones, ha cambiado de modo espectacular en los últimos años. Unas tecnologías revolucionarias han modificado el abanico de productos, y por otro lado el mundo de la empresa exige hoy entregar productos ya no sólo al mínimo coste sino además con la máxima calidad y flexibilidad ante las demandas de los clientes. En la última década, los fabricantes han reducido los costes, acortando en extremo los tiempos de producción y estableciendo sistemas para producción en serie. No obstante, los años 90 nos obligarán a concentrarnos más en nuestros negocios esenciales, lo cual nos permitirá entregar una mayor variedad de productos en tales terrenos aplicando métodos de producción flexibles. Cobrará mayor importancia para nuestros clientes el valor añadido a los productos, como puede ser la seguridad en la entrega, innovación, amplitud de la gama cubierta, flexibilidad ante la demanda y el coste de adquisición mínimo. Finalmente, Alcatel será juzgada más por su respuesta total que por el precio de sus productos. La fabricación es por tanto de importancia estratégica para nuestro negocio en el futuro.

Suministrar productos de calidad con cortos tiempos de producción y de entrega y reducir al mínimo los niveles de inventario solamente es posible si dominamos las tecnologías básicas de fabricación para ensamble, prueba e instalación de equipos, y las herramientas para integración del soporte lógico. En el afán de satisfacer los futuros requisitos de mayor flexibilidad, más breves tiempos de entrega y mejor logística, con demasiada frecuencia olvidamos nuestra profesión básica, que es dominar unos procesos de fabricación en continua variación. Los productos futuros presentarán densidades de empaquetamiento mayores, seguirán aumentando las velocidades de operación y se utilizarán en todos los productos nuevas tecnologías como la optoelectrónica. La gestión térmica se convertirá en un aspecto crítico, y la interferencia electromagnética y de radiofrecuencia exigirá una mayor atención. Al mismo tiempo, la tecnología de interconexión necesitará un desarrollo ulterior para tener en cuenta el aumento de densidad de componentes y las mayores velocidades de operación.

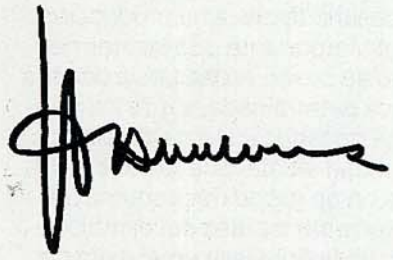
Todos estos cambios en el diseño del producto empujarán a la industria de fabricación a desarrollar procesos y herramientas de producción más potentes. Habrán de elaborarse métodos de ensamble que puedan lograr esas grandes densidades de empaquetamiento y hacer realidad la compleja tecnología de interconexión del mañana. Deberán revisarse las técnicas de prueba para asegurar que se acomodan a la mayor complejidad del sistema y a sus superiores prestaciones; es imprescindible incorporar la capacidad de prueba en el diseño. Tecnologías como la optoelectrónica requerirán una familia completa de nuevos procesos de fabricación, prueba e instalación, incluyendo la elaboración de métodos para calificación y vigilancia de procesos. Será esencial para el logro de tales objetivos una estrecha unión entre las funciones de investigación, desarrollo, ingeniería, fabricación e instalación. Por añadidura, habrá que utilizar con mayor eficacia la tecnología de la información, adaptándola a satisfacer nuestras necesidades futuras.

El contenido en mano de obra de los productos de telecomunicación disminuye a razón de un 8 a 10% al año, con lo que el coste total de los sistemas electrónicos modernos

incluye sólo una pequeña proporción de mano de obra directa, mientras que el coste de elementos (componentes) adquiridos a menudo sobrepasa el 40% del coste de las ventas. La mayoría de los demás costes se vinculan a la generación y manipulación de información. Por consiguiente, la *planificación de estrategia de información* es un tema clave para Alcatel en general, y para las casas fabricantes en particular. Los proyectos de fabricación integrada por ordenador iniciados en los cinco a siete años anteriores han integrado ya las funciones de diseño, planificación y fabricación, y en el futuro tendrán que evolucionar hacia un enfoque empresarial informatizado que cubra también funciones como las financieras, de personal, marketing e instalación. Las nuevas demandas de clientes obligarán a los fabricantes a utilizar con mejor rendimiento la tecnología de la información. Los "sistemas" funcionarán en entornos descentralizados que utilicen una variedad de bases de datos distribuidas, mientras que unos "sistemas" más pequeños se integrarán operacionalmente en un contexto global de sistema de información. Estos nuevos sistemas no solamente tendrán que integrar las numerosas funciones de una compañía sino que ofrecerán enlaces con suministradores externos y clientes. Los actuales sistemas de fabricación, planificación y control tendrán que ser potenciados para encarar la creciente necesidad de ayudar a la toma de decisiones en los niveles estratégico, táctico y operativo. Estamos contemplando ya un mayor uso en fabricación de la inteligencia artificial y de otras tecnologías de la información, al tiempo que se introducen más herramientas de soporte de procesos. La tecnología de la información es pues un elemento estratégico en la fabricación, aportando beneficios a largo plazo más bien que rápidas mejoras.

En este nuevo contexto de la fabricación, la gente necesitará desarrollar nuevas especializaciones. Percibimos, en un futuro, cuatro tipos de funciones: básicas, logísticas, técnicas y gestoras; cada una de ellas exige un adiestramiento específico, pero todas se apoyan en la tecnología de la información. Desaparecerá la distinción entre personal "directo" e "indirecto", siendo los trabajadores "base" del mañana operadores muy capacitados, con un nivel de responsabilidad más elevado sobre la calidad y el tiempo de producción. El personal logístico (planificación y control) requerirá pericia en proceso de datos y técnicas de gestión para toma de decisiones. La función técnica (ingeniería de soporte del proceso) debe adoptar una visión y un enfoque globalizadores, ya que el ciclo de vida total de un producto se inicia en nuestros suministradores y termina en las dependencias del cliente. La gestión de la fabricación debe ser capaz de identificar y utilizar la información relevante entre la vasta cantidad de "datos" que entregan los sistemas de información modernos. Será mucho más importante la toma de decisiones que la resolución de problemas. Muchas compañías creen que uno de los grandes retos es el de disponer de una adecuada dosificación de personas y aptitudes, y en Alcatel – a nivel de grupo y de compañía individual – se han establecido intensos programas de capacitación para superar tal desafío.

El personal de fabricación de Alcatel trabaja con gran ardor para ser los "mejores" en este mutante entorno. En este número de *Comunicaciones Eléctricas* algunos de ellos describen las dificultades que han tenido que superar para alcanzar sus actuales niveles de maestría en fabricación, analizan los sistemas que están utilizando y encaran los desafíos del futuro. Espero que estos artículos ayudarán al lector a comprender con mayor hondura las tecnologías de fabricación modernas, y le permitirán vislumbrar el modo en que, en algún momento por venir, se integrarán con todas las demás funciones de una compañía fabricante.



Armand Wielockx
Director de Tecnología de Fabricación Avanzada
Alcatel Advanced Manufacturing Technology Centre
Zaventem, Bélgica

De la investigación a la producción en serie

La investigación y el desarrollo pueden con frecuencia conducir a tecnologías de productos y fabricación radicalmente nuevas, pero es indispensable su transferencia satisfactoria y económica a la producción para poder aprovecharlas íntegramente. Con el fin de ayudar a esta transferencia de tecnología, Alcatel ha creado métodos de cooperación y trabajo conjunto que permiten la introducción de nuevos desarrollos sin retrasar la producción.

E.-J. Duhm
Alcatel SEL, Stuttgart, República Federal de Alemania
A. Wielockx
Alcatel AMTC, Zaventem, Bélgica

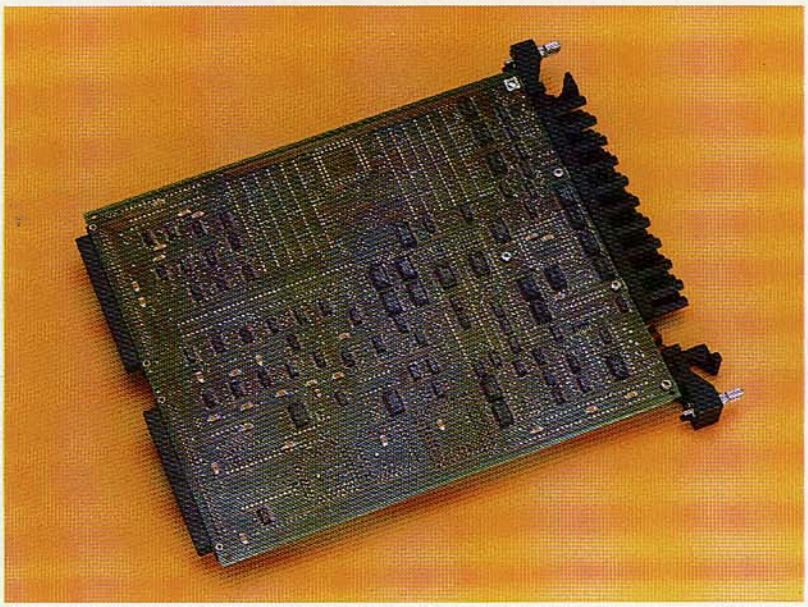
Introducción

Investigación es la producción de conocimientos orientados – en nuestra sociedad industrial – hacia el desarrollo de nuevos productos. La comunidad investigadora elabora principios cuya aplicabilidad y factibilidad se demuestran mediante la construcción de un modelo. La experiencia recogida en dichos modelos es utilizada luego por los diseñadores para desarrollar un producto básico, y en muchos casos conduce a una familia de productos o a la mejora de los productos existentes. En una fase posterior, el producto básico se adapta a las necesidades específicas de los usuarios, dando lugar generalmente a versiones diferentes para cada país. La tarea final del diseñador es proporcionar la documentación de fabricación requerida para la producción en serie, utilizando normas de diseño que tengan en cuenta la capacidad de las fábricas.

Aunque ésta sea una imagen en exceso simplificada del nacimiento de un nuevo producto, deja vislumbrar las etapas que han de cubrirse antes de que pueda comenzar la producción. Si se ha concebido un producto para ser fabricado por métodos establecidos – por ejemplo, tecnología de circuitos impresos –, habrá normas de diseño que sean expresión del "estado de la técnica" en ese área. Las casas fabricantes de Alcatel celebran reuniones regulares para asegurar que todas las fábricas tengan medios comparables y utilicen procesos similares, reflejados en las normas generales de diseño. Se garantiza así que los productos diseñados por una compañía puedan ser fabricados por otra, en caso de que sea necesario trasladar la producción. Es por lo tanto importante que las normas de diseño no se basen en las posibilidades de una fábrica determinada, y que los nuevos procesos de fabricación desarrollados por la comunidad Alcatel puedan ser utilizados por más de un grupo de productos.

Dada la creciente rapidez del cambio tecnológico, un factor clave en el éxito de un producto nuevo es su velocidad de introducción. En general, los productos diseñados para utilizar procesos de fabricación acreditados tardan un tiempo mínimo en introducirse. Existe el peligro de que, cuando se requieran tecnologías nuevas y avanzadas, este tiempo aumente notablemente por la carencia de normas de diseño o métodos de producción ya probados. El diseño inicial podría entonces ir y venir

Placa equipada con dispositivos montados en superficie.



varias veces de ingeniería a fábrica, ocasionando cambios, pérdida de tiempo, escalada de los costes de iniciación, y finalmente un alto coste del producto.

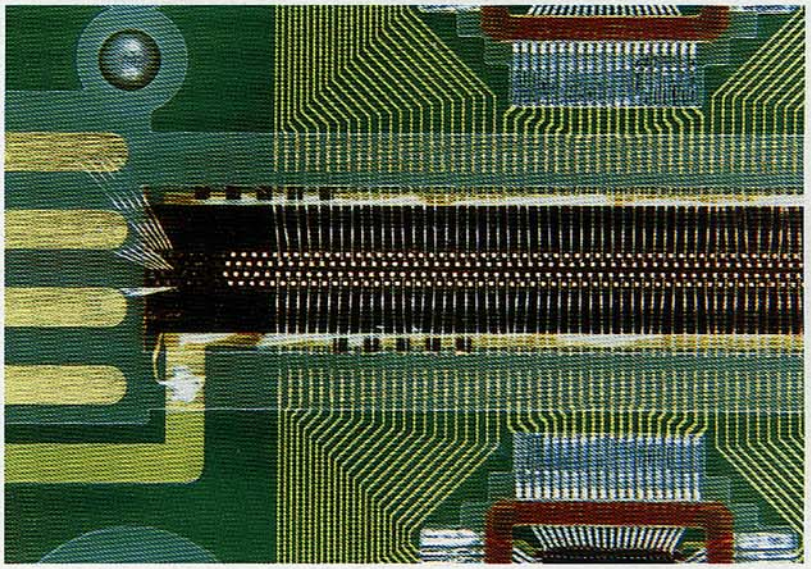
Para evitar esto, las innovaciones en la fabricación no deben estar en el camino crítico para la introducción del producto. Las nuevas tecnologías de fabricación deben desarrollarse en paralelo con el diseño del producto, de tal modo que se tengan normas de diseño antes de haber finalizado el referido diseño del producto y completado la documentación de fabricación. Se plantea aquí un dilema al ingeniero de fabricación. ¿Qué nuevas tecnologías de fabricación deben desarrollarse, calificarse e introducirse, y en qué momento? Las casas fabricantes, ¿deben invertir en tecnologías no aplicables a los productos incluidos en sus programas de producción? Por otro lado, ¿pueden los diseñadores concebir productos utilizando tecnologías en las que todavía no haya invertido la casa fabricante? Si persiste este "círculo vicioso" durante un tiempo apreciable, el diseño de productos y la fábrica se quedarán anticuados y el negocio decaerá.

La elección de tecnologías de fabricación está sobre todo determinada por la estrategia de negocio de la Compañía y por los datos del mercado. No obstante, existen otras fuerzas motrices tales como los competidores, suministradores, organizaciones profesionales y, en este caso, la comunidad investigadora de Alcatel.

Nuevos productos y nuevas exigencias tecnológicas: algunos ejemplos

La operación digital y unas frecuencias y velocidades de transmisión más elevadas son características de los sistemas futuros. Las aplicaciones RDSI (red digital de servicios integrados) de banda ancha y estrecha requerirán nuevos circuitos integrados de diseño a medida y alta velocidad, que imponen nuevas exigencias a los sustratos y a las técnicas de interconexión. Para satisfacer estos requisitos más estrictos se están desarrollando ya nuevos materiales de base, algunos de los cuales llevan estructuras de líneas de cinta apantalladas.

En los más recientes sistemas de transmisión óptica a larga distancia son típicas las velocidades de transmisión por encima de 2 Gbit/s. Son un desarrollo importante en este campo los componentes para convertir señales eléctricas digitales en señales ópticas, y viceversa. Están en preparación componentes activos esenciales que imponen estrictas exigencias a la tecnología de fabricación, algunos de los cuales han sido particularmente importantes en cuanto a transferencia de tecnología de los laboratorios a la fábrica pasando por el desarrollo del producto. Los futuros sistemas de banda ancha necesitarán nuevos componentes, más económicos, especialmente para uso en el área de abonado.



Detalle de una cabeza de impresión óptica construida mediante la técnica TAB.

Las tecnologías LSI (integración a gran escala) y SMD (dispositivos de montaje superficial) están jugando un papel más destacado en los terminales de abonado, permitiendo ofrecer una gama completa de funciones en terminales compactos como los de la nueva generación de teléfonos portátiles. Aunque la tecnología SMD se está utilizando ya en numerosos productos Alcatel, se espera una rápida evolución ulterior en este campo. El desarrollo de encapsulados más efectivos para circuitos integrados, junto con nuevos sustratos y técnicas de interconexión, hará surgir nuevas exigencias tecnológicas.

El uso creciente, en todos los grupos de productos, de circuitos integrados específicos de la aplicación está conduciendo a componentes con más de 300 terminaciones, lo cual lleva a sus límites la tecnología de encapsulado convencional. Ofrecen posibles soluciones tecnologías como la TAB (soldadura automática por cinta), que son el desarrollo lógico siguiente en tecnología SMD. Sin embargo, las placas de circuito impreso que vayan a utilizarse con TAB deben tener estructuras de menos de 100 μm y capas de metalización controlada. Las nuevas técnicas de metalización emplearán materiales con coeficientes de dilatación más bajos y mayor conductividad térmica.

Cierto número de productos que utilizan TAB y estructuras de línea fina se han transferido con éxito de los centros de

investigación a los de producción. La TAB se ha experimentado en las cabezas de impresión óptica, basadas en la cerámica de óxido ferroeléctrico que se denomina PLZT (plomo-lantano-zirconato-titanato).

Además de las tecnologías adecuadas para una extensa gama de productos, como la SMD, hay otras con características específicas que pueden aprovecharse para desarrollar tipos de productos enteramente nuevos. No obstante, tales productos sólo podrán hacerse realidad si se desarrollan tecnologías básicas de fabricación apropiadas y se transfieren desde los centros de investigación a las casas fabricantes. Así, por ejemplo, la tecnología de transmisión óptica ha servido para desarrollar el sensor o giróscopo de fibra óptica, utilizable en futuros sistemas de navegación inercial. Además del devanado de fibra – una fibra monomodo que preserva la polarización –, este sensor contiene varios componentes optoelectrónicos, tales como diodos emisores y receptores y un modulador de fase óptico integrado. Estos avanzados componentes ópticos trabajan conjuntamente con dispositivos electrónicos compactos.

Desarrollo e introducción de nuevas tecnologías básicas de producción

Los requisitos técnicos impuestos a numerosos productos avanzados obligan al desarrollo de nuevas tecnologías básicas de fabricación. Una vez que los modelos de laboratorio han demostrado que el producto puede funcionar según lo exigido, es necesario desarrollar las tecnologías básicas de producción en serie. Estas tecnologías tienen luego que llevarse a la práctica y documentarse para que las áreas correspondientes consigan una producción reproductible y rentable.

A menudo existen tecnologías de fabricación con otras aplicaciones, pero su combinación y uso para fabricar productos avanzados es a la vez un reto y una oportunidad. Por ejemplo, la producción de componentes optoelectrónicos activos reúne diversas tecnologías y procesos de fabricación, incluyendo tecnología de semiconductores, técnicas de proceso y empalme de fibras ópticas, y técnicas de fabricación mecánica, estructuración de sustratos de película delgada y ensamble de alta precisión, por no citar sino las más importantes.

Tecnología de semiconductores

Los semiconductores de silicio son la base de la fabricación de casi todos los circuitos integrados. La mayoría de las compañías Alcatel desarrollan y diseñan circuitos LSI total y parcialmente a medida. Las pastillas de semiconductor se fabrican tanto por compañías Alcatel como por suministradores externos. Como los circuitos LSI de alta velocidad requieren una considerable inversión en equipo de prueba para su desarrollo y fabricación, resulta económico hacer un uso conjunto de los medios de investigación, desarrollo y producción, según es habitual en Alcatel.

Los semiconductores de InGaAsP son la base de la fabricación de pastillas de emisores y receptores ópticos en longitudes de onda de 1000 a 1600 nm. Se depositan capas cristalinas sobre un sustrato de InP por epitaxia de fase líquida o de fase vapor. Las siguientes etapas de proceso incluyen la fotolitografía, deposición y ataque químico de las películas delgadas y la difusión, rayado y partición de las obleas. Finalmente, se utiliza para probar los componentes un refinado equipo de medidas optoelectrónico.

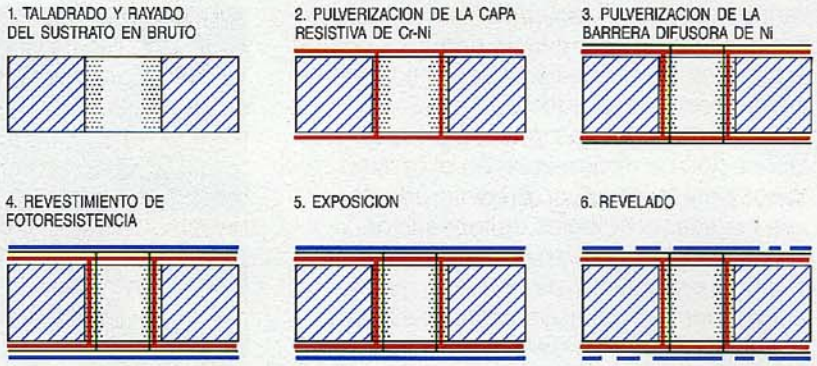
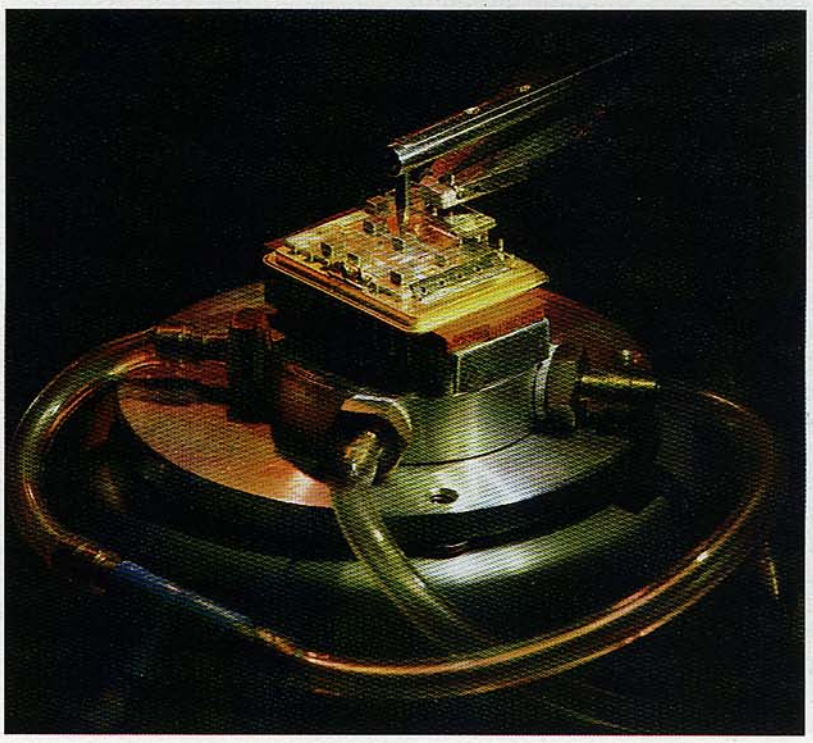


Figura 1
Estructuración de sustratos de película delgada.



Ensamble y soldadura de pastillas de semiconductores.

Habida cuenta de las inversiones y el saber-hacer necesarios, es práctico concentrar en una sola compañía de Alcatel la producción en serie de estas pastillas de emisores y receptores ópticos.

Tecnología de película delgada
La tecnología de película delgada es la base de muy diversas aplicaciones. Las capas conductoras y resistivas se producen sobre vidrio u óxido cerámico mediante deposición o pulverización en vacío. Las capas conductoras y taladros se refuerzan luego con galvanizado, y finalmente se estructuran para producir circuitos de película delgada (Fig. 1). Estos circuitos se utilizan en aplicaciones de alta frecuencia, así como en las que exigen alta precisión y estabilidad.

También se utiliza la tecnología de película delgada en la metalización de los extremos de la fibra de vidrio para soldadura, la metalización y estructuración de cerámica PLZT para cabezas de impresión ópticas, las pastillas ópticas integradas y los transistores de película delgada, entre otras áreas.

Técnicas de soldadura
Las técnicas de soldadura utilizadas en microelectrónica se aplican también en los módulos optoelectrónicos. En muchos casos la formación de capas metálicas sobre el sustrato es de particular importancia, sobre todo cuando se utilizan sobre el mismo sustrato diferentes técnicas de interconexión (por ejemplo, soldadura por hilos y por fundente). La TAB se está destacando como técnica acertada para circuitos LSI a medida con gran número de terminaciones y para circuitos que requieren altas densidades de empaquetamiento.

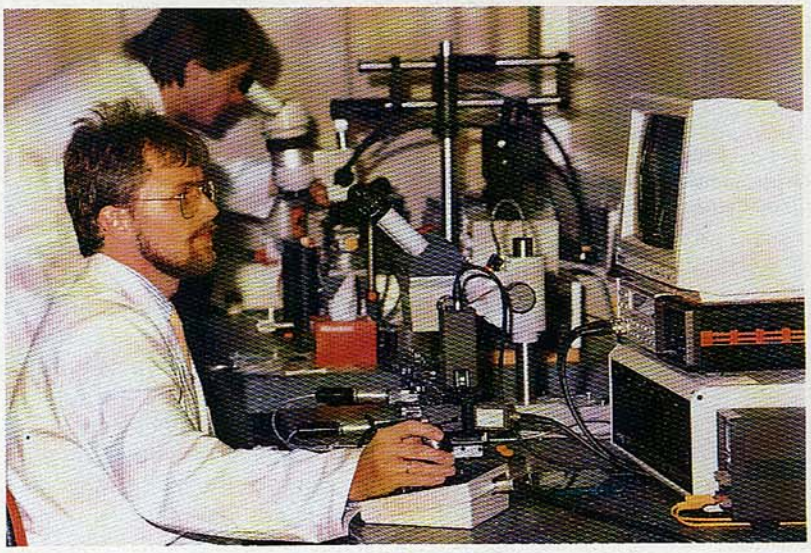
Tratamiento de la fibra
El tratamiento de la fibra es importante en la fabricación de componentes para sistemas de comunicaciones ópticas, en los que se requiere una baja atenuación óptica de un extremo a otro del enlace. Las fibras se desnudan, se rayan y se cortan; los extremos metalizados se sueldan, se realizan por fusión lentes miniatura en las extremidades de la fibra de vidrio, se pulimentan las caras de las fibras soldadas y adheridas, y después se funden las fibras para formar empalmes fiables.

En todos estos procesos, es crucial un posicionamiento exacto de la fibra. Considerando que una fibra óptica monomodo tiene un diámetro de núcleo de unos 10 µm, la posición de los extremos de la fibra debe ser fijada con precisión superior a 1 µm respecto a otros componentes – láseres, diodos, circuitos integrados –, manteniéndose invariable durante toda la vida útil del equipo.

Técnicas de prueba
Además de los procedimientos de prueba utilizados para componentes electrónicos, se están elaborando nuevos procesos, particularmente en la optoelectrónica, en los que pueden combinarse la óptica, la mecánica y la electrónica. Procesos como los que se aplican para medir características de láseres, potencia y atenuación ópticas, reflexión de líneas y espectro modal serán complementados por nuevos procesos a medida que éstos se hayan desarrollado.

El interés principal se centra en la adaptación de los procedimientos de medición en laboratorio a los requisitos de la producción en serie, con automatización al menos parcial de los procedimientos de prueba. Debe prestarse especial atención a la reproductibilidad, así como al desarrollo de métodos de prueba para los parámetros que deban medirse durante la producción. Esto se aplica, por ejemplo, al equipo utilizado para probar componentes y módulos en cuanto a características de radiación de los diodos láser y las fibras de vidrio, linealidad de los detectores ópticos en una gama de potencia de 90 dB, sensibilidad de detectores ópticos y uniformidad de la misma. Como ejemplo, la figura 2 muestra la variación de sensibilidad en la superficie de un fotodiodo de germanio de gran área.

Prueba de pastillas ópticas integradas.



Un problema particular de las mediciones optoelectrónicas es la necesidad de una alta precisión, pese a las relativamente bajas reproductibilidad y estabilidad de los instrumentos de medida optoelectrónicos. Si no se hace nada por evitarlo, los resultados obtenidos sobre el mismo elemento por dos configuraciones de prueba distintas pueden diferir en más del 40 %. Naturalmente esto puede provocar discrepancias

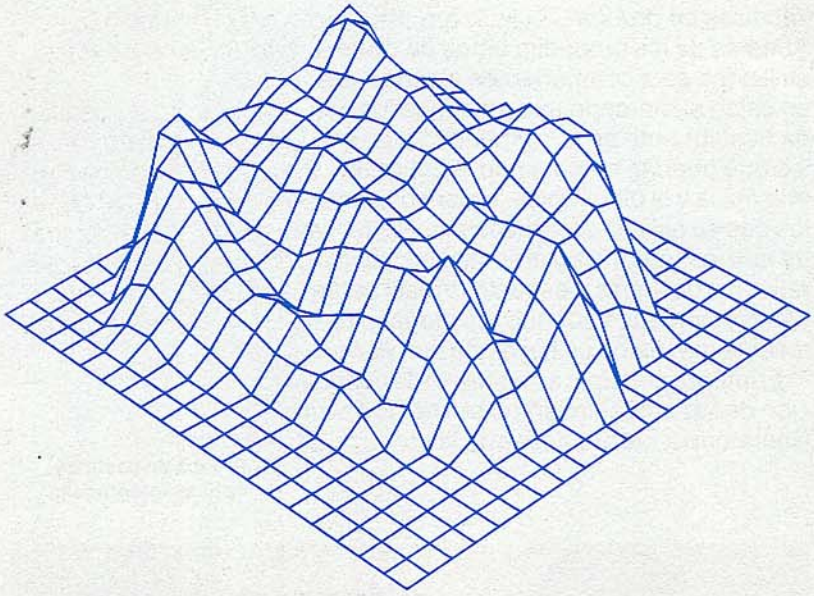


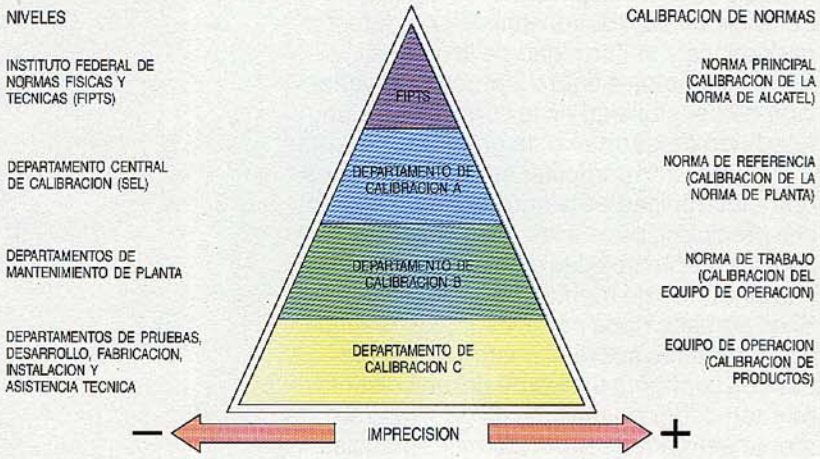
Figura 2
Ejemplo de la distribución de sensibilidad en la superficie de un diodo detector óptico.

entre suministradores y clientes y dificultar la distribución de medios de prueba y fabricación entre diferentes lugares. Una forma de allanar este problema es mantener y calibrar con regularidad el equipo de pruebas que se utilice en fabricación.

Dado que los medios de calibración de los fabricantes de equipos de prueba suelen ser limitados, Alcatel ha establecido su propio sistema jerárquico de normas de referencia, que se basan en las normas dictadas por el Instituto Federal de Normas Físicas y Técnicas (Physikalisch-Technische Bundesanstalt), como indica la figura 3. Los procedimientos de calibración se acuerdan conjuntamente por las compañías de Alcatel, que practican el intercambio regular de las normas.

En un plazo muy breve Alcatel ha conseguido armonizar las diversas normas nacionales e internacionales de referencia, asegurando así una alta precisión en las medidas y la reproductibilidad de los resultados de las pruebas.

Figura 3
Jerarquía de calibración para equipo de pruebas y medidas.



Transferencia de experiencia, desarrollo y producción

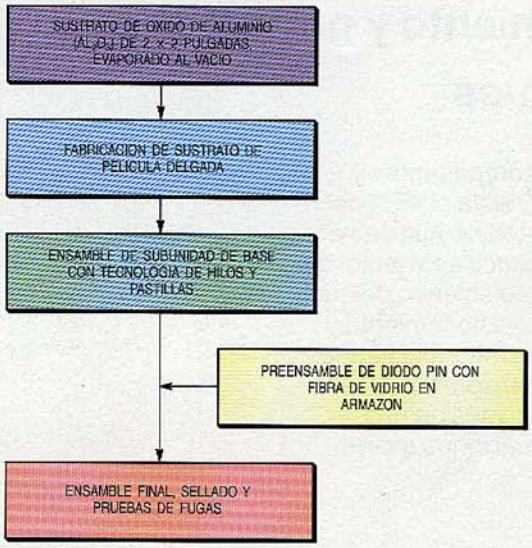
Para asegurar una transferencia gradual de los resultados de investigación y las tecnologías básicas asociadas, conviene que exista cierto solape entre la investigación y la producción. En tal sentido, Alcatel ha adquirido gran experiencia, ya que representantes de las ingenierías de fabricación y de métodos trabajan junto con el equipo investigador, a veces hasta todo un año, para asimilar los conocimientos y experiencia relevantes y después transferirlos al departamento de producción. Este intercambio de información asegura que se elaboren a tiempo métodos de fabricación adecuados. Frecuentemente es posible, en la fase de investigación y desarrollo, la cooperación con los diversos departamentos de especialistas de la planta de producción con el fin de evaluar en una etapa temprana los costes de las alternativas tecnológicas, y aplicar criterios económicos a la elección entre tales alternativas.

En el caso de proyectos complejos, la transferencia etapa por etapa ha demostrado su efectividad, mediante el uso por parte de producción del equipo e instrumentos de prueba del laboratorio de investigación desde los comienzos del proyecto. Como ejemplo de esta cooperación puede citarse un módulo PIN FET y el giróscopo de fibra óptica.

El módulo receptor PIN FET para los sistemas de transmisión óptica ilustra la interacción entre diversas técnicas de fabricación (Fig. 4). Al principio de la producción, el centro de investigación proporcionó sustratos que habían sido sometidos a una pulverización previa (presputtering), y el saber-hacer de los investigadores fue el fundamento para iniciar la fabricación en la planta. Tras adaptarla a la producción en serie, la base de esta tecnología se estableció en la planta de producción y se expandió a medida que los nuevos productos y aplicaciones lo fueron necesitando.

En fotolitografía se utilizaron equipos y procedimientos ya comprobados para la fabricación de sustratos multipastilla. No obstante, el proceso de limpieza del sustrato demostró las ventajas de una estrecha cooperación entre las unidades de investigación y producción. Los métodos propuestos originalmente sólo podrían haberse aplicado en la fábrica tras una fuerte inversión en medidas de seguridad, razón por la cual hubo que desarrollar otros procesos

Figura 4
Proceso básico de producción de un módulo PIN FET.



de limpieza e introducirlos en una etapa temprana.

Conclusiones

Una estrecha cooperación entre los departamentos de desarrollo y fabricación y los centros de investigación es esencial para que una compañía cumpla sus objetivos de negocio. Una vez que los centros de investigación han demostrado que un componente o producto puede ser construido en el laboratorio, los prototipos así obtenidos deben probarse en condiciones industriales reales. Es entonces cuando el prototipo de laboratorio se convierte en producto reproductible que puede fabricarse en serie de modo económico.

En ciertos casos, ésto sólo será posible mediante el desarrollo conjunto de nuevas tecnologías básicas por los departamentos de desarrollo y de producción, y su adaptación para el uso en un ambiente de fábrica. Esta tarea debe ser apoyada por una investigación de aplicaciones orientada a la tecnología, tanto en departamentos de desarrollo como en los de producción.

Ernst-Jürgen Duhm nació en Berlín-Charlottenburg, en 1941. Estudió mecánica y tecnología de fabricación en Esslingen, donde se graduó en 1966. Ingresó entonces en SEL como ingeniero de métodos, convirtiéndose más tarde en supervisor de un equipo de planificación para técnicas de fabricación. En 1973 se trasladó al centro de coordinación multinacional LEAP 2 MCC, pasando dos años después a dirigir ese centro. Desde 1981, el Sr. Duhm ha sido responsable del departamento de tecnologías de fabricación avanzadas y representa a Alcatel SEL como director de fabricación dentro de Alcatel.

Armand Wielockx nació en Mol, Bélgica, en 1943. Tras graduarse en ingeniería electrónica y física nuclear, en 1968 ingresó en BTM (hoy Alcatel Bell Telephone) para poner en marcha la factoría de Geel donde más tarde introdujo la fabricación electrónica para el producto Metaconta 10C*. En 1978 se incorporó al ITC para traer el diseño inicial del Sistema 12 desde los Estados Unidos a Alemania, Bélgica, España e Italia. En 1983 inició la operación del Advanced Manufacturing Technology Centre (AMTC), el cual dirige actualmente, constituido como un departamento del centro ejecutivo de Alcatel situado en el ACC, en Bruselas.

* Marca registrada del Grupo Alcatel

Aprovisionamiento y normalización de componentes

Hoy en día, el coste de componentes y materiales puede llegar hasta el 45% del valor de un producto de telecomunicación, por lo que es esencial reducir este factor de coste lo más posible estableciendo procedimientos eficaces de aprovisionamiento y normalización. Alcatel ha introducido una estrategia de aprovisionamiento que satisface las diversas necesidades de una empresa de telecomunicaciones avanzada.

J.M. Rice
Alcatel NV, París, Francia
J. van der Donk
Alcatel Bell Telephone, Amberes, Bélgica

Introducción

Los diferentes hábitos existentes en Alcatel y la estructura de gestión descentralizada de dicha Compañía han planteado singulares desafíos en el campo de gestión de materiales, donde son esenciales la economía de escala y los ciclos de corta duración. El coste de los materiales para un producto de telecomunicación moderno suele representar del 40% al 45% del valor de venta. Como Alcatel se limita a fabricar unos pocos componentes escogidos, que son de importancia estratégica, para el aprovisionamiento de componentes y materiales ha de depender de suministradores externos que satisfagan sus exigencias en cuanto a precios, calidad y disponibilidad.

La gestión de unos 5000 millones de ECU en compras anuales reside en un pequeño equipo centralizado a nivel de Alcatel, que cuenta con el apoyo operativo de departamentos técnicos y de compras descentralizados. La carencia de normalización de materiales, especificaciones y códigos de componentes al constituirse Alcatel a principios de 1987, obligó a seguir un método escalonado para garantizar que este importante factor del coste se trate de un modo que asegure unos costes, calidades y tiempos de diseño y producción plenamente competitivos.

Las principales etapas fueron:

- Hacer que la dirección, de cualquier nivel que sea, se entere mejor de la repercusión de los costes de material sobre sus operaciones, e introducir estructuras organizativas que permitan gestionar eficazmente tales costes.
- Consolidar las compras a nivel de toda la Compañía para conseguir mejores condiciones de los proveedores. Al principio esto se aplicó a elementos comunes y normalizados en la industria, donde las referencias cruzadas entre códigos de identificación de los suministradores y de las casas Alcatel eran relativamente sencillas y se notaban pronto las ventajas de comprar en cantidad. Se amplía actualmente este enfoque para asegurar la disponibilidad de todos los componentes estratégicos a partir de fuentes que satisfagan las exigencias de Alcatel en cuanto a tecnología, suministro, precio y calidad.
- Establecer una red de ordenadores que ofrezca a todas las casas Alcatel acceso en tiempo real a información de la Compañía sobre el estado de tecnología y calidad de los componentes, los contratos de compras, los términos y las condiciones.
- Desarrollar un sistema de codificación y documentación común utilizable por todas las Casas y Grupos de Productos Alcatel para simplificar la transferencia de productos, mejorar la consolidación de compras y facilitar la creación de equipos de desarrollo entre varias compañías.

Estructura de compras mundial

Alcatel es una compañía descentralizada con negocios en 110 países de todo el mundo. La organización de compras está también descentralizada, pero su concep-

ción asegura que todas las compañías tengan acceso a proveedores y a suministros a los niveles de precios y de calidad necesarios para competir con éxito en la industria de telecomunicación. Asimismo garantiza que todas las casas Alcatel reciban un servicio completo de los proveedores, incluyendo una rápida entrega y un pleno soporte técnico.

Se ha introducido una estructura organizativa consistente en "consejos de compras" responsables de grupos de componentes y materiales (p. ej., componentes activos, materias primas, equipos/programas). Cada consejo está dirigido por un presidente que rinde cuentas al departamento centralizado de compras, y dentro del consejo se asignan mercancías específicas a los jefes de grupos de trabajo que negocian contratos con los suministradores en nombre de todas las casas Alcatel (Fig. 1). Inicialmente estos consejos se centraban en componentes electrónicos estándar, pero han evolucionado hasta incluir componentes para cuatro Grupos de Productos (redes públicas, transmisión, comunicaciones de empresa y cables), así como servicios generales del tipo de hoteles y alquiler de coches.

Los consejos disponen del soporte de una red de ordenadores mundial que permite a los jefes de los grupos de trabajo poner en común y consolidar sus necesidades. También ofrece acceso a las herramientas que ayudan en los análisis y negociaciones. Todos los centros tienen acceso directo a los términos y condiciones de los acuerdos, y pueden producir todos los informes y estudios que necesite la dirección local, tales como fluctuaciones de precios, facilidades de los suministradores o cambios de moneda.

Aparte de la estructura de consejos, las compañías Alcatel tienen acceso a las oficinas de compras en Extremo Oriente y Estados Unidos, las cuales prestan un soporte logístico y de información a las casas Alcatel y pueden inspeccionar in-situ las dependencias del proveedor para cerciorarse de que los componentes satisfacen la calidad especificada y están disponibles en cuanto se requiera. El objetivo final es suprimir la inspección de entrada en las diferentes compañías.

La formación de Alcatel ofreció una oportunidad única para comparar la eficacia de las técnicas de compra de ámbito general y local, ya que las distintas compañías y Grupos de Productos habían seguido anteriormente diversos métodos. La experiencia hasta el día de hoy demuestra que unas negociaciones sostenidas correctamente por Alcatel y apoyadas en herramientas eficaces reducen de modo notable el coste global de los materiales. En consecuencia, la Compañía está ampliando los fines y contenidos de estas actividades.

Normalización de la codificación y documentación de ingeniería

Los excelentes resultados obtenidos con la consolidación de las compras en lo que se

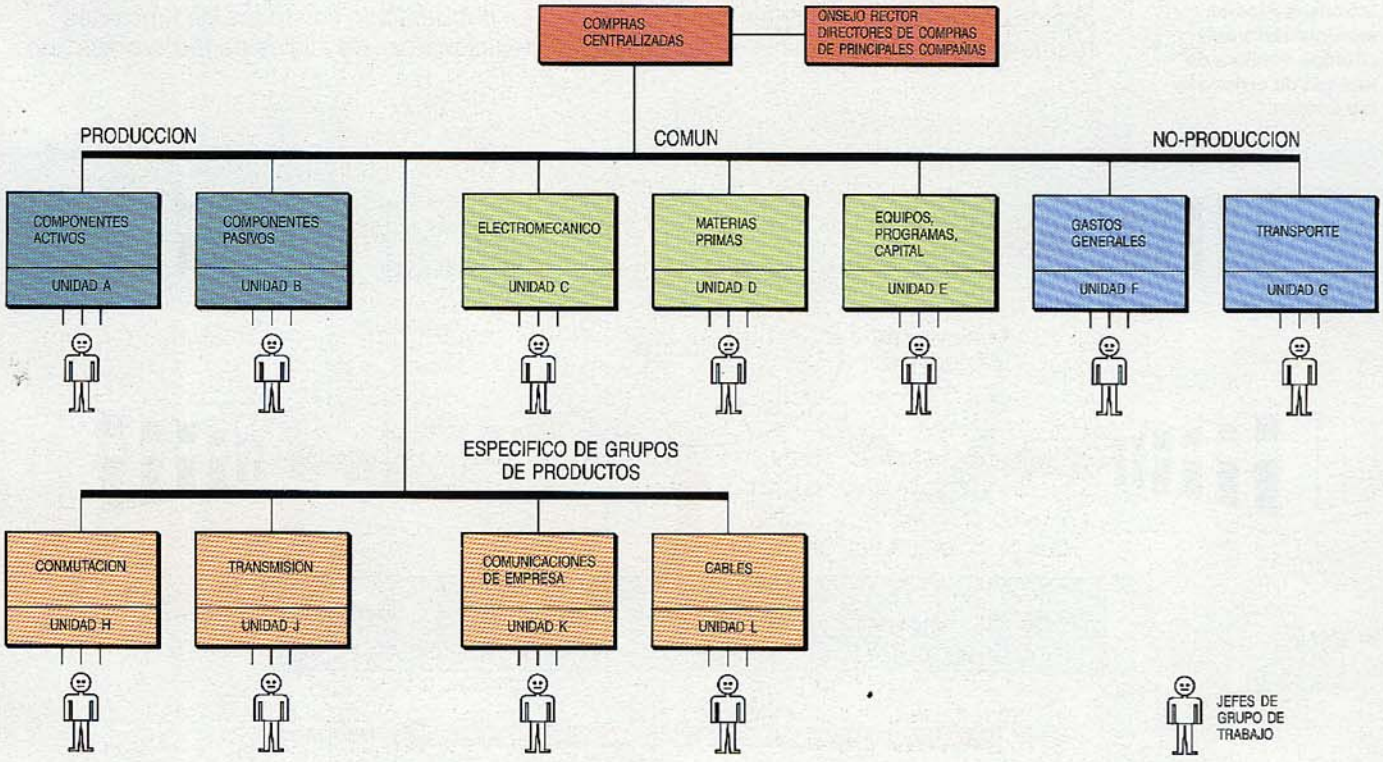


Figura 1
Organización de compras de Alcatel NV.

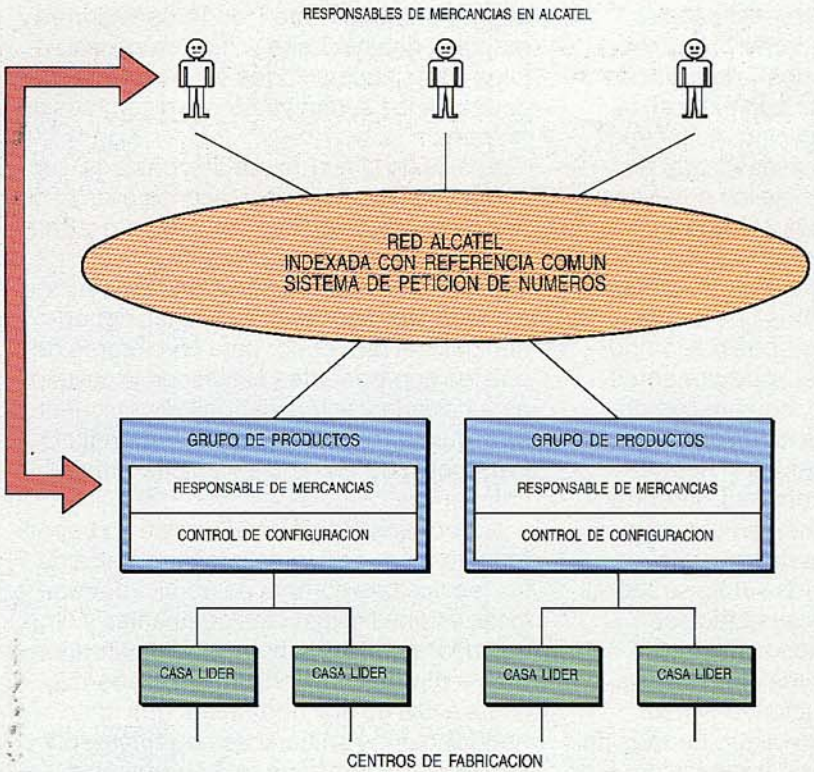


Figura 2
Estructura organizativa de la codificación y documentación en Alcatel.

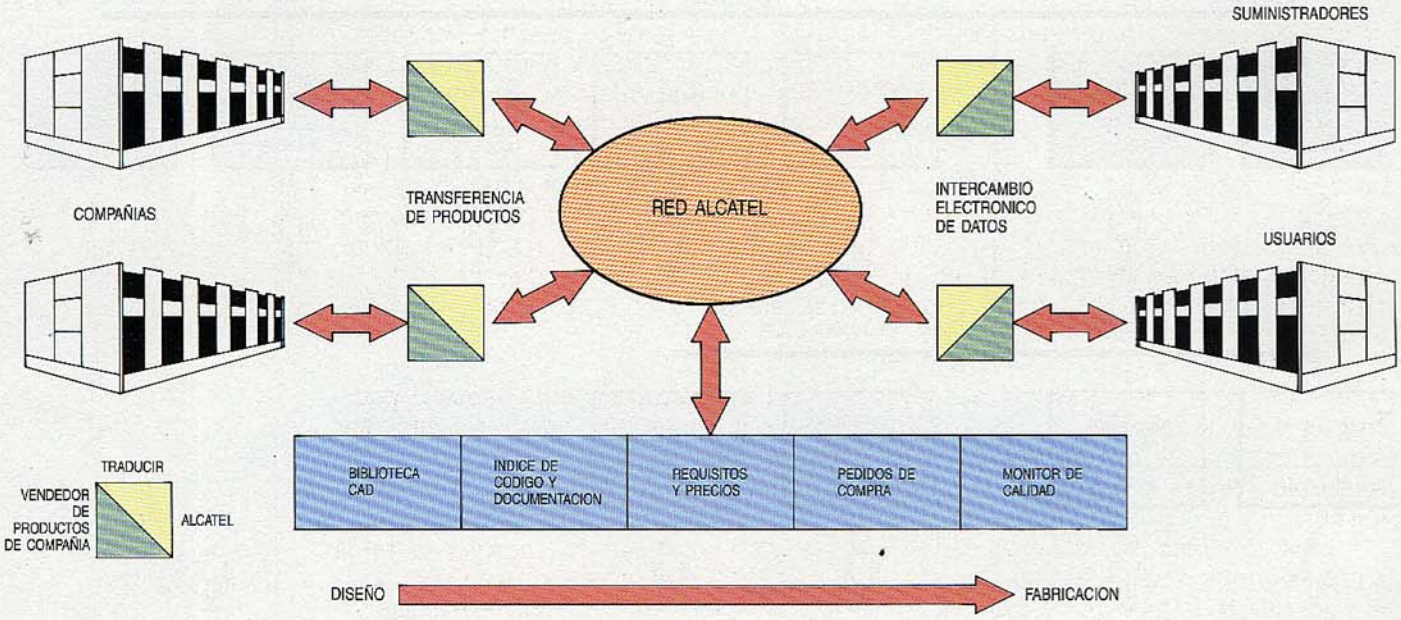
refiere a cooperación, trabajo en equipo, y empleo de una red de la Compañía dieron una base firme para abordar el objetivo – más complejo – de normalizar sistemas internos de codificación y documentación de componentes. La natural evolución de los ciclos de vida de productos y la expansión del mercado de Alcatel han dado un fuerte impulso a este proyecto.

La transferencia de productos entre centros de fabricación y la formación de equipos de desarrollo de múltiples compañías requieren sistemas compatibles de diseño asistido por ordenador, de fabricación integrada por ordenador y de documentación. Además, la expansión del programa de consolidación de compras y de otro programa afín orientado a reducir el número de componentes y suministradores aprobados sólo será posible si a través de Alcatel pueden identificarse elementos similares, lo cual no es tan fácil como parece.

Con objeto de contribuir a los objetivos esenciales de consolidación de compras, transferencia de productos y desarrollo multicompañía, se formó un grupo de trabajo para elaborar un sistema de codificación y documentación común. Se han acordado ya unas reglas básicas y directrices que recibirán un nuevo desarrollo por parte de grupos de trabajo multiproducto. Las responsabilidades operativas en este área – generación de especificaciones, calificación de suministradores, etc. – se han descentralizado también, desempeñando la gestión global el departamento centralizado de compras. La responsabilidad del programa general de normalización se confió a dicho departamento, dada la considerable repercusión de las compras externas en los resultados financieros de la Compañía, y para conseguir armonizar las estrategias de aprovisionamiento comerciales y técnicas.

La codificación y documentación se basa en un sistema común de petición de números informatizado, mediante el cual todas las compañías y centros de diseño solicitan códigos para nuevos equipos, programas y lógica microprogramada (Fig. 2). Los responsables de mercancías, ubicados en centros técnicos especializados de las compañías, tienen a su cargo el desarrollo, en cooperación con todas las funciones relacionadas, de "listas de preferencia" de

Figura 3
Integración de todas las casas Alcatel, suministradores y clientes a traves de una red de ordenadores común.



	CI a medida, biblioteca de células, ordenaciones de puertas	Integración en gran escala	Integración en media y pequeña escala, lineales	Semiconductores discretos	Componentes pasivos	Conectores	Componentes electromecánicos
Competitividad del mercado	Alta	Alta	Alta	Alta	Moderada	Moderada a escasa	Baja
Tecnología	Alta	Alta	Moderada	Baja	Baja	Baja	Baja
Ciclo de vida del producto	Controlado por usuario	Corto	Moderado	Largo	Largo	Largo	Largo
Multiplicidad de proveedores	Controlada por usuario	Moderada	Buena	Buena	Buena	Moderada a escasa	Escasa
Ámbito geográfico	Global	Global	Global	Local	Local	Local	Local
Impacto cíclico de precios y existencias	Pequeño	Fuerte	Fuerte	Pequeño	Pequeño	Pequeño	Pequeño
Número de proveedores para cubrir necesidades	Bajo	Moderado	Bajo	Bajo	Bajo	Alto	Alto
Normalización	A nivel de la tecnología	Buena	Buena	Suficiente	Suficiente	Escasa	Escasa
Disponibilidad vía distribución	N/A	Buena	Buena	Suficiente	Escasa	Baja	Baja

Figura 4
Características de compra principales del mercado de componentes electrónicos.

componentes o tecnologías para uso en nuevos productos. Dichos componentes y tecnologías están respaldados por programas centralizados para la calificación de componentes, generación de bibliotecas CAD y contratos de compra. Las compañías se benefician de la inmediata disponibilidad de todos los datos relevantes, no teniendo que asignar recursos a buscar información por su cuenta. Las peticiones de nuevos códigos se dirigen por la red de ordenadores a los responsables de mercancías en Alcatel, quienes las revisan para confirmar su coherencia con las estrategias de suministro. La decisión final sobre utilizar o no un componente incumbe al responsable del producto o grupo de productos.

Para ser eficaz, la información de codificación y documentación de cada elemento debe estar al alcance de todos los centros de diseño y fabricación. Para lograrlo se está creando una base de datos indexada con una referencia común. Los datos se mantienen automáticamente mediante el sistema de petición de números y otras herramientas operativas en las distintas compañías. Está ya funcionando un sistema parcial, que se ampliará y ajustará al nuevo sistema de codificación de Alcatel durante 1989, al mismo tiempo que todas las casas Alcatel se integran en una red de ordenadores común.

La rápida integración de las compañías Alcatel en la red mencionada empleando sistemas de codificación y documentación comunes es de la máxima prioridad, no solamente para las comunicaciones internas, sino también para comunicarse con los suministradores y usuarios utilizando técnicas electrónicas de intercambio de datos con miras a reducir el tiempo invertido en el desarrollo e introducción de un producto (Fig. 3).

Aprovisionamiento de componentes en una compañía

Cada una de las compañías debe organizarse para operar dentro del entorno Alcatel con miras a aprovechar al máximo todas las ventajas que ofrece la estructura de compras centralizada. Como ejemplo de la manera de integrar la estrategia de la compañía particular con la de todo el Grupo, se describe seguidamente la estructura de aprovisionamiento creada por Alcatel Bell Telephone. Aunque se centre en componentes electrónicos, gran parte de la descripción es aplicable a cualquier componente.

Mercado de componentes electrónicos
El mercado de componentes electrónicos es muy diverso, abarcando desde simples resistencias y fusibles hasta avanzados circuitos integrados. La figura 4 muestra las características clave de unos componentes seleccionados: se aprecian importantes diferencias desde el punto de vista de

aplicación entre el mercado de la electrónica de consumo y el de sistemas militares y espaciales. Esta diversidad debe tenerse en cuenta al crear una organización de compras; en la mayoría de los casos el personal de esta función debe concentrarse en mercados o artículos específicos.

Como todas las mercancías de máxima importancia estratégica para Alcatel, cuales son los circuitos integrados y otros dispositivos semiconductores, poseen tecnologías avanzadas, es esencial la capacidad financiera y técnica de los suministradores correspondientes. La competencia entre ellos por aumentar su cuota de mercado da lugar a un continuo avance del estado de la técnica y a ciclos de vida de producto cada vez más cortos. Los principales motores de cambios en el mercado son la electrónica de consumo y la industria de ordenadores. En consecuencia, el comportamiento cíclico de tales industrias y la tecnología que requieren afectan al mercado de todas las demás industrias que utilizan componentes semejantes. En concreto, la tecnología de telecomunicación se ha beneficiado señaladamente de los cambios aportados por los dos tipos de industria mencionados.

Ingeniería de aprovisionamiento de mercancías

La tarea de un agente de compras consiste en armonizar las necesidades de la compañía con lo que existe en el mercado. Técnicamente, ello implica hermanar las exigencias de los diseñadores de circuitos, sujetas a rápidas variaciones, con la evolución tecnológica gradual de los suministradores. Esto no es fácil en una industria con productos de corto ciclo de vida. Para encarar este reto, Alcatel Bell Telephone ha creado la función específica de *ingeniería de aprovisionamiento de mercancías.*

Cada experto de esta ingeniería debe completar cierto número de tareas con sus mercancías. Sus acciones responden primordialmente a peticiones de utilizar nuevos componentes, recibidas de los ingenieros de diseño. Cuando le llega una petición tal, el experto comprueba una serie de factores, que incluyen:

¿El componente tiene una sola o varias fuentes?

¿Es normal en esta industria?

¿Qué otros usuarios principales existen por sectores de industria?

¿Es un producto maduro o se está ya desterrando?

¿Está incluido en la lista de componentes preferidos de Alcatel?

¿Cuál es su plazo de entrega?

¿Lo fabrican proveedores fiables?

¿Hay alguna restricción por patentes o licencias?

¿Quedan alternativas si algo va mal (p. ej., si se destierra ese componente, o surgen problemas de producción o de calidad)?

¿Hay componentes alternativos que se utilicen ya en otros diseños?

Basándose en estos análisis, y en minuciosos debates con los diseñadores y el oportuno responsable de mercancías de Alcatel, se rechaza o se aprueba el uso del componente. Si se aprueba, se pide el número de pieza al índice de referencia común de la red Alcatel a través del sistema de petición de número de pieza (Fig. 2).

Un experto en aprovisionamiento debe tener una sólida formación técnica y un buen conocimiento práctico de las disciplinas relacionadas, como son la ingeniería de diseño, la producción y el control de calidad. El contacto diario con el comprador dedicado a la mercancía es necesario para garantizar que la información transmitida al grupo de diseño se apoye en buenas razones comerciales. Además se requieren frecuentes contactos con los departamentos de calidad y producción.

La autorización de un nuevo número de pieza marca de hecho la transferencia de responsabilidad del nuevo componente al experto de aprovisionamiento, el cual responde de su calidad y disponibilidad a lo largo de su vida útil y debe iniciar las acciones pertinentes siempre que una u otra se vean amenazadas, actuando así como un interfaz entre suministradores y departamentos de la compañía. En casos escogidos actuará como responsable de mercancía en nombre de Alcatel.

La introducción de esta función ha reducido grandemente el uso de fuentes no fiables en diseños nuevos, ha asegurado una rápida respuesta a cambiantes condiciones del mercado y ha hecho progresar la normalización tanto en las compañías individuales como en Alcatel.

Ingeniería de aprovisionamiento de proyectos

Si bien el enfoque hacia mercancías específicas de la ingeniería de aprovisionamiento ha sido una clave de su éxito, también podría entorpecer futuras mejoras resultantes de una acertada integración de los componentes. Como ejemplo, tal vez conviniera incluir una red de resistencias en un circuito integrado en lugar de considerarla como componente discreto. Esto afecta a la integración a medida, la hibridización, la subcontratación de funciones completas, y la entrega de juegos de material.

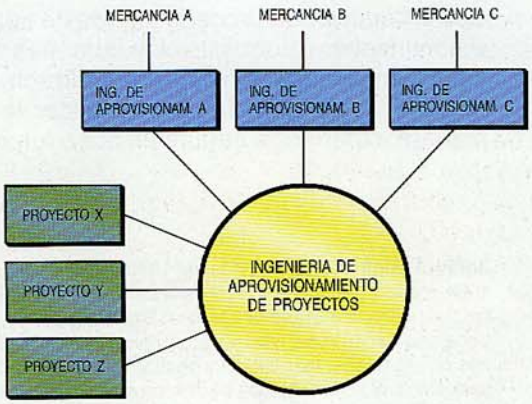


Figura 5
Organización matricial de la ingeniería de aprovisionamiento de proyectos.

Para tratar con estos aspectos, se ha creado la función complementaria de *ingeniería de aprovisionamiento de proyectos.* Fuertemente orientada hacia proyectos, esta función interviene lo antes posible en el ciclo de diseño. El experto en aprovisionamiento de un proyecto sirve de interfaz entre los equipos de ingeniería de dicho proyecto y la ingeniería de aprovisionamiento de mercancías (véase la figura 5), actuando como miembro del equipo de diseño más que su colega de aprovisionamiento de mercancías. Tiene la responsabilidad de asegurar que cualquier decisión global tomada durante el desarrollo de un nuevo producto está en línea con los objetivos de aprovisionamiento, a saber:

- reducción del número de suministradores
- flexibilidad de las entregas de componentes (que no haya componentes de difícil obtención) de modo que se pueda reaccionar con rapidez a la variación de demanda de un producto
- partición óptima entre piezas a "hacer" y piezas a "comprar"
- uso de componentes normalizados, incluidos en la lista de preferencias
- reducción de costes.

El papel de la ingeniería de aprovisionamiento de proyectos no se limita a los nuevos diseños. Algunos productos requieren un seguimiento regular para asegurar que las condiciones de compra óptimas conseguidas durante el diseño se mantengan, o incluso se mejoren, durante la vida del producto. Esta ingeniería coordina tales planes de seguimiento.

Conceptos de aprovisionamiento avanzados

Alcatel Bell Telephone está aplicando nuevos conceptos a la compra de componentes, como el principio JIT (justo a tiempo), TOC (teoría de las restricciones), y cero defectos. La implantación de los principios JIT y TOC hace más flexible y fiable el suministro de componentes, reduce costes y aumenta la productividad. Sin embargo, el modo de aplicar estos conceptos, ya muy familiares en otras compañías e industrias, ha de ajustarse cuidadosamente a las necesidades de Alcatel, e incluso a las de las compañías individuales.

Aunque el método JIT haya obtenido éxito en la producción de aparatos telefónicos de abonado, hay varios puntos a considerar en una organización de aprovisionamiento:

- sólo un número escogido de componentes pueden comprarse según JIT (a diario o semanalmente)
- en el caso de componentes de bajo coste, mantener un depósito de reserva es a la vez más económico y seguro
- la proximidad geográfica entre Alcatel y sus proveedores es una baza importante pero difícil de lograr en un mercado mundial
- las previsiones y los planes de entrega de suministros son de máxima importancia.

La TOC puede ayudar a determinar dónde conviene más introducir métodos JIT. Cuando se aplica al aprovisionamiento, la TOC busca sistemáticamente los componentes que ocasionarían un cuello de botella durante la fabricación de un producto, tal vez por su inestable calidad o por escasez de entregas. Estos componentes no son adecuados para el uso de JIT, pues son tan críticos o el suministro es tan inflexible que deberían sustituirse por otros o, si ello no es posible, mantener cierta reserva de los mismos. Los componentes que crean cuello de botella generalmente presentan una o más de las siguientes características:

- tienen largos plazos de entrega
- se están introduciendo o desterrando
- su calidad es inestable
- carecen de suministradores fiables.

Para asegurar que estos elementos no crean ningún problema, los componentes destinados a productos importantes se revisan periódicamente según estos criterios, y se adoptan medidas correctoras por anticipado. Ello puede requerir contratos especiales con los suministradores, calificación de suministradores nuevos o bien desterrar el componente en cuestión. Donde sea preciso utilizar elementos de esta índole, se mantendrán en inventario o serán objeto de acciones de gestión especiales (ejemplo, los recientes problemas de

entrega con memorias estáticas y dinámicas). Los elementos de alto coste y gran volumen que no ocasionen cuellos de botella son ideales para un enfoque JIT.

El programa "cero defectos" se ha aplicado en toda la Compañía, con el fin principal de evitar las inspecciones de entrada; para ello se ha de asegurar que existe la suficiente correlación entre las pruebas de Alcatel y de sus suministradores principales a través de auditorías regulares realizadas en las fábricas de estos últimos. Esto requiere un plan bien estructurado, apoyado en un compromiso a largo plazo entre ambas partes. Durante dichas auditorías, unos especialistas idóneos comprueban cuidadosamente todos los parámetros que afectan a la calidad y a la entrega del producto. Este programa ha demostrado que la inspección de entrada, con sus costes, retrasos, etc., se puede suprimir sin deteriorar la calidad del producto.

Conclusiones

La experiencia en Alcatel ha demostrado que es posible obtener significativos beneficios introduciendo procedimientos de aprovisionamiento y normalización comunes dentro de una compañía descentralizada. Aunque resta mucho trabajo por hacer, la primera experiencia augura un buen futuro.

John M. Rice nació en Irlanda, en 1942. Se graduó en 1964 como ingeniero eléctrico en la Universidad Nacional de Irlanda, e ingresó en General Electric (EE.UU), trabajando en Europa, Asia y EE.UU. en diversas funciones de ingeniería, fabricación y gestión en las áreas de semiconductores, sistemas de información y materiales. En 1981 entró en el ITC (International Telecomunications Centre) en Bruselas como director de compras para el Sistema 12, siendo luego nombrado director de compras y gestión de materiales. Cuando se formó Alcatel NV en 1987, el Sr. Rice pasó a director asociado de las compras de la Compañía.

Jean van der Donk nació en Gante, Bélgica, en 1954. Se graduó en ingeniería eléctrica y más tarde obtuvo un doctorado en comunicaciones ópticas en la Universidad de aquella ciudad. En 1981 ingresó en Bell Telephone, Gante, donde dirigió los laboratorios de fibras ópticas y materiales durante tres años. El Dr. van der Donk pasó a encargarse del departamento de ingeniería de aprovisionamiento en 1985. Actualmente dirige el aprovisionamiento de componentes y materias primas en Alcatel Bell Telephone, en Amberes.

Industrialización del producto

Para asegurar la fabricación de un producto al menor coste posible sin sacrificar la calidad, es importante fijarse tal objetivo desde el principio del desarrollo. La denominada industrialización del producto juega así un papel destacado en el diseño y la fabricación del mismo.

D. Maulay
Alcatel ATC, Ormes, Francia
J. Verspecht
Alcatel Bell Telephone, Amberes, Bélgica

Introducción

El éxito de un producto depende de su aceptación por los usuarios, de que sea introducido en un momento adecuado y de su coste. La industrialización del producto, que es el proceso de convertir un concepto de diseño en un producto acabado, juega un papel esencial en el logro de estos objetivos, ya que asegura que el producto cumple las especificaciones de diseño al mínimo coste y sin retrasos inaceptables en su producción. Ello tiene cada vez mayor importancia dado el continuo acortamiento de los ciclos de vida de la producción.

Industrialización del producto

El objetivo de la industrialización del producto es disminuir duración y coste del desarrollo industrial, y reducir tanto los costes del producto como su ciclo de producción. La figura 1 muestra el ciclo de vida de un producto típico. Para reducir los costes globales, la industrialización del producto se ha de acometer durante las fases de definición y desarrollo.

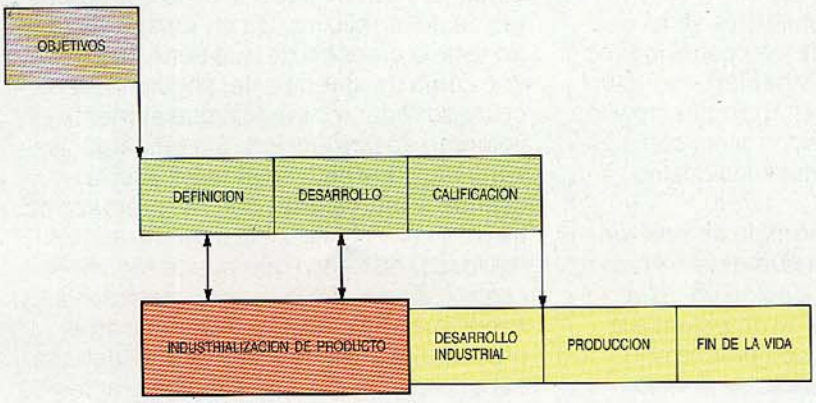
En el caso de nuevos productos, la fase de producción está resultando menos costosa y ocupando cada vez menos tiempo, lo que obliga a reducir el coste y los tiempos de ejecución de las etapas anteriores para aprovecharse plenamente de la mayor eficacia de fabricación. Por esta razón, las tareas de industrialización del producto han de realizarse en paralelo con las de desarrollo y calificación. La fabricación de un nuevo producto requiere:

- herramientas de fabricación y prueba adecuadas
- desarrollo de programas para máquinas de fabricación y equipos de prueba automáticos
- documentación de fabricación
- capacitación de personal.

Los costes de fabricación de un producto incluyen coste de los componentes, mano de obra directa e indirecta, y costes financieros y de inversión. En algunos casos estos factores están directamente ligados al producto y podrían reducirse mediante un diseño adecuado, mientras que otros factores – equipo de fabricación no especializado, inventario – requieren acciones que afectan a un grupo de productos.

El ciclo de producción abarca todas las operaciones desde la compra de componentes a la entrega al cliente, debiendo todas ellas optimizarse para que el producto se entregue a tiempo y con el coste y la calidad adecuados. Por esta razón ha de lograrse un equilibrio entre la reducción de los costes de producción y el aumento de la flexibilidad del proceso productivo.

Figura 1
Ciclo total de la vida del producto.



Logro del objetivo de industrialización

Costes de componentes
La elección de componentes en la fase de diseño afecta de diversos modos a los

costes del producto. Primero, en el precio de los propios componentes; segundo, en los costes de manipulación que supone su transporte a la fábrica, y por último en el número de etapas de producción requeridas.

El precio de un componente depende de su función y de que sea o no estándar para el suministrador, así como de la fase de su ciclo de vida en que se encuentra. En consecuencia, antes de comenzar un diseño y en colaboración con el departamento de compras, se establece una lista de componentes aprobados, incluyendo componentes que están o en fase de iniciación o en los comienzos de la madurez. Se excluyen los componentes que se están desterrando, y se prefieren aquéllos que sean estándar para los suministradores.

Durante la fase de diseño se investigan los compromisos relativos al nivel de integración de componentes. Por ejemplo, una sola pastilla diseñada a medida podría reemplazar a varias decenas de componentes, y aunque su precio sea mayor que el de todos esos componentes tal vez haga descender el coste global de la producción.

Por el contrario, un componente podría tener un precio muy reducido y en cambio elevar el coste de la producción por tener un diseño poco estable o demasiado complejo y requerir muchas pruebas.

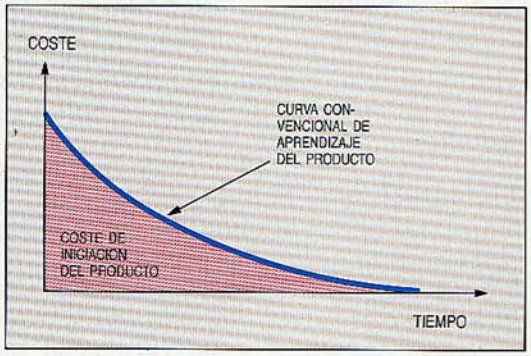


Figura 2
Costes del producto en función del tiempo.

Costes de producción

Recientemente el mayor interés se ha desplazado a la reducción de los costes indirectos. Todavía se utiliza la ingeniería industrial normal para optimizar el trabajo directo y la automatización, pero se completa con actividades enfocadas a reducir los costes generales.

La reducción del número de componentes de un producto y del número de etapas de tratamiento, la seguridad de un diseño resistente (bajo número de defectos) y la facilidad de fabricación y de prueba son parte integrante del proceso de diseño.

Se han establecido y materializado en los sistemas de diseño asistido por ordenador (CAD), reglas de diseño que aseguran una fácil fabricación. Estas reglas sirven de base al diseño y no deben ser tan restrictivas que impidan soluciones creativas. La cooperación entre ingeniería y fabricación en el proceso de diseño sigue siendo de primordial importancia.

Costes de desarrollo industrial

El desarrollo industrial incluye todas las tareas necesarias para acometer la fabricación de un producto nuevo, las cuales han de realizarse rápidamente y con un coste mínimo. Para conseguir esto, los diseñadores deben tener presentes tres puntos:

- Los productos deben diseñarse siguiendo unas reglas orientadas a la fabricación y a la aptitud para pruebas con arreglo a tecnologías industriales, actuales y futuras, plenamente experimentadas por el departamento industrial para asegurar la consecución de la calidad requerida.
- Los datos procedentes de sistemas CAD deben aportarse lo antes posible, incluso como diseño preliminar, para que puedan iniciarse las tareas del desarrollo industrial.
- Se reducirá considerablemente el desarrollo de herramientas, máquinas y equipo de pruebas en el caso de que hayan de utilizarse en un grupo de productos con tecnologías comunes.

Así, por ejemplo, los comprobadores funcionales deben estar concebidos para cubrir una amplia gama de productos, tales como los electroópticos de 2 Mbit/s a 2,4 Gbit/s, los productos de RDSI, el equipo de comunicación de vídeo y los modems. Ello requiere incluir medidas y métodos de medición en la especificación de tales productos.

Otro factor, rara vez considerado como coste de desarrollo industrial, es el coste de iniciación (Fig. 2), que es la diferencia entre el coste real función del tiempo y el coste objetivo, y puede superar a los demás costes de desarrollo industrial. Todavía es muy general la creencia de que tiene que haber una curva de aprendizaje, según la cual el coste se reduce a medida que aumenta el volumen de producción. Sin embargo, la verdad es que esto solamente ocurre cuando la industrialización del producto no se hizo correctamente la primera vez. En realidad, ¿qué es lo que puede reducir el coste? ¿El que las personas aprendan a hacer su trabajo o se familiaricen con el producto? Si esto fuera así, se las debería haber capacitado adecuadamente antes de

comenzar la producción. ¿Pequeñas modificaciones del producto para facilitar su fabricación? En tal caso, una correcta industrialización al principio habría asegurado que la fabricación se optimizaba desde su comienzo. Análogamente, los rechazos del producto suelen descender al transcurrir el tiempo, lo cual también podría evitarse prestando más atención a tales rechazos en la etapa de depuración del producto.

En un futuro, los productos de más éxito serán aquéllos que alcancen su coste final de un modo casi inmediato.

Caja de modem.

Coste del mantenimiento

En las industrias de fabricación es bien conocido el hecho de que el coste de reparación de un fallo antes del ensamble en la línea de producción se multiplicará por cien cuando el fallo sea detectado por el usuario y haya de ser reparado en sus dependencias. Por otra parte, casi un tercio de todos los productos que se devuelven al fabricante para reparación no presentan defecto alguno. La principal razón de ello es que los usuarios no tienen forma de determinar si es el producto o su entorno de funcionamiento lo que falla. Por tal motivo es importante incorporar medios para reparación y mantenimiento en el diseño del producto, lo que resulta relativamente fácil en la primera fase del desarrollo.

Como ejemplo, Alcatel produce una gama de modems que generalmente son utilizados por personas con muy escasos o nulos conocimientos de electrónica. Para simplificar la localización de faltas, estos modems ofrecen facilidades como autoprueba interna, bucle local y bucle remoto. Los resultados de estas pruebas se visualizan, en francés e inglés, en el panel frontal, permitiendo al usuario determinar si la falta está en el terminal, el modem remoto (incluida la línea) o el modem local.

Tiempo de introducción del producto

La creciente competencia industrial hace necesario reducir el tiempo requerido para desarrollar y fabricar un producto. Ha de alcanzarse un equilibrio entre ambas tareas para conseguir una reducción del tiempo global, siendo necesario tener en cuenta las restricciones que el diseño y la fabricación se imponen entre sí. Por esta razón, los fabricantes deben investigar nuevas tecnologías de producción que puedan aplicarse en todos los productos futuros, y los diseñadores deben utilizar reglas de fabricación y de prueba elaboradas durante la realización de nuevos procesos o nuevas maquinarias de producción.

En realidad, los procesos de fabricación no cambian frecuentemente, y las reglas de fabricación ofrecen un buen apoyo a la ingeniería de diseño. Sin embargo, éste no es el caso de los procesos de prueba, que requieren el diseño de un banco de pruebas funcionales para cada nuevo producto. Dado que esto puede requerir un largo tiempo, sobre todo en productos de transmisión de alta velocidad binaria, vale la pena diseñar bancos de prueba para utilizarse en varios productos, tal como ya se ha hecho en la familia de productos electroópticos que cubren la gama de 2 Mbit/s a 2,4 Gbit/s. En efecto, un documento general para los mismos describe los procedimientos de prueba industriales que han de incluirse en las especificaciones de prueba de producto, así como la configuración de las pruebas de acuerdo con una lista de instrumentos preferidos. En consecuencia, todas las pruebas a efectuar sobre esta familia de productos pueden utilizar el mismo banco de pruebas, reduciendo los costes de inversión apreciablemente y acortando en más de la mitad el tiempo requerido para introducir un producto nuevo.

Un factor importante para lograr unos cortos tiempos de introducción de producto es un flujo de información eficaz entre las diferentes funciones. El uso de una base de datos común es de extrema importancia, ya que la transferencia manual de información está sujeta a errores.

Relación entre el ciclo de producción y el diseño del producto

Un aspecto del proceso de industrialización que requiere cada vez mayor atención es la duración del ciclo de producción. El diseño afecta esencialmente a este proceso, y por ello es tarea destacada dentro de la industrialización del producto la de buscar modos

de eliminar el tiempo de preparación, que obliga a la fábrica a producir por lotes en vez de hacerlo por elementos. Por ejemplo, el uso de componentes normalizados para restringir la diversidad de los tipos y la adopción de un tamaño de placa único ayudan a suprimir dichos tiempos.

Reducir el número de etapas del proceso es también importante. El proceso de diseño tiene una influencia considerable en este área, sobre todo la partición del sistema y la elección de los componentes. Por ejemplo, si una placa de circuito impreso tuviera junto a componentes montados en superficie otros convencionales (por ser de menor coste), podría ser más económico sustituir estos últimos por componentes montados en superficie para suprimir así una etapa de proceso.

El plazo de entrega al usuario ha llegado a ser tan importante que a lo largo del diseño y la industrialización se ha de poner especial cuidado en reducir este periodo al mínimo.

Aplicaciones

Módems de segunda generación

Los modems de segunda generación fabricados por Alcatel CIT son un buen ejemplo de industrialización y demuestran la importancia de que en el equipo de desarrollo participen diseñadores e ingenieros de fabricación para conseguir una reducción del coste global.

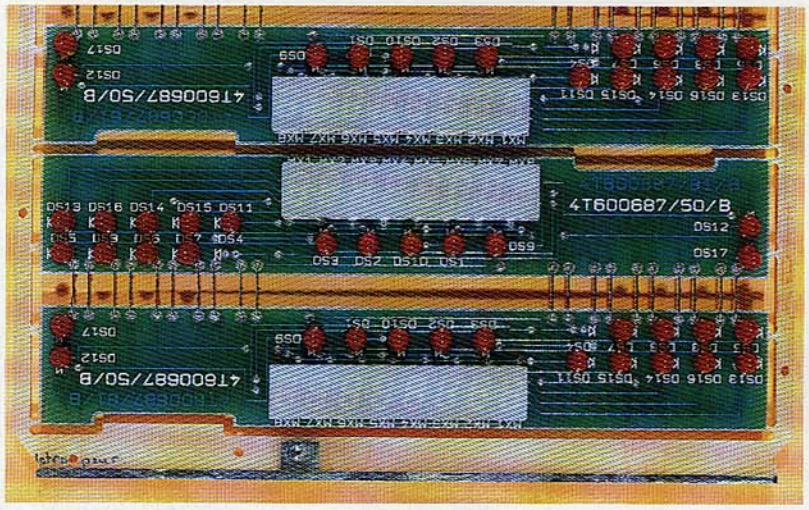
En primer lugar, el enfoque de la industrialización abarca toda la familia de modems, que trabajan a velocidades de 1200 a 9600 bit/s, y por ello pudo aprovecharse el mayor volumen de producción para reducir el coste del material comprado, que representa alrededor del 80% del coste de producción en este tipo de aparatos. Todos los componentes eléctricos utilizados fueron seleccionados atendiendo no sólo a su precio de compra sino también a todos los costes asociados a la fabricación. Las piezas mecánicas son las mismas para todos los modems de la familia; se utilizaron piezas de plástico de ajuste a presión para suprimir la necesidad de tornillos, simplificando así el ensamble. Se cuidó grandemente el diseño de herramientas mecánicas para las piezas moldeadas, con el fin de garantizar que éstas fueran adecuadas para utilizarse en todos los modems. Esto obligó a definir por completo el producto antes de iniciar el diseño.

Para reducir el coste de las placas de circuito impreso, cada modem incluye dos o tres placas utilizables por los demás modems. Así, la placa del panel frontal es la misma para todos ellos, con lo que se reducen los costes de ensamble de placas y componentes. Varias placas necesitan conectores, siempre costosos, y por esta razón la referida placa del panel frontal se fabrica en múltiples: varios ponteados se insertan automáticamente entre dos placas, se cortan luego tras la soldadura y sirven de conectores económicos.

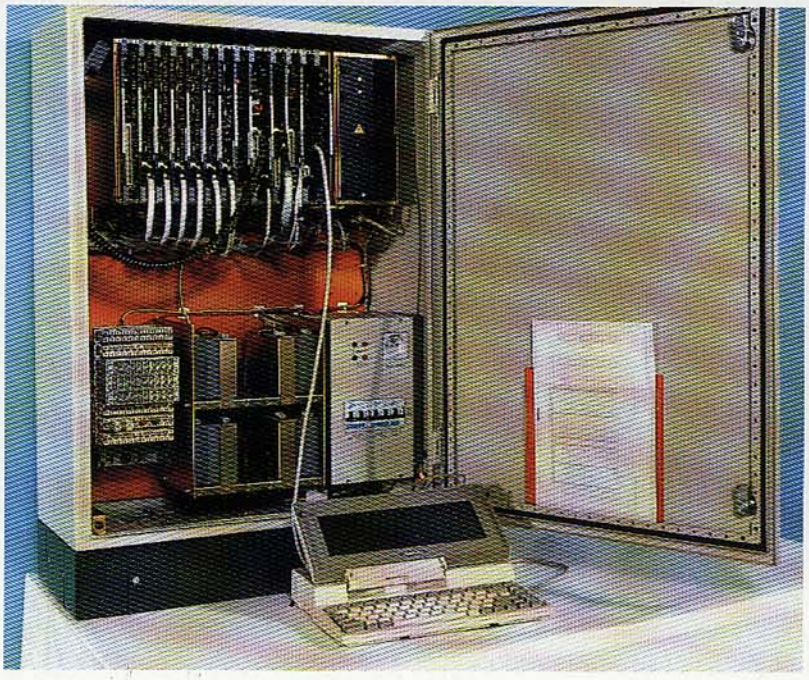
Para optimizar los costes, el proceso de producción tiene un número mínimo de etapas y utiliza en la medida posible estaciones de trabajo automatizadas.

La prueba funcional de todos los modems de la gama se realiza en un banco de pruebas automáticas. Puede, no obstante, omitirse si las tasas de fallos observadas durante la fase de pruebas final son suficientemente buenas.

Se ha desarrollado un análisis de marcas para placas de circuito impreso digitales a



Placa del panel frontal del modem. Se fabrican conjuntamente varias placas como una sola unidad y luego se dividen tras ser probadas.



Procesador portátil utilizado en la instalación para introducir órdenes de prueba y leer resultados.

fin de reducir los tiempos de reparación. Tales métodos permiten un diagnóstico rápido y seguro con un instrumento de pruebas sencillo, y no requieren personal de mantenimiento experimentado.

Tras el ensamble de las placas, un máximo de 48 modems de diversos tipos se insertan en un contenedor móvil conectado a la alimentación de la red y se transportan a la sala de pruebas de maduración, en la que durante 48 horas se ejercitan las facilidades de autoprueba previstas en cada modem. Transcurrida la prueba de dos contenedores (96 modems), se conectan ambos al banco de pruebas finales donde son probados automáticamente, sin intervención humana, durante unas 10 horas.

Esto es posible porque los modems poseen facilidades de prueba tales como el control automático de configuraciones de usuarios, y el banco de pruebas puede detectar automáticamente el tipo de modem probado. Dichas facilidades pertenecen al soporte lógico no modificable (firmware) del modem, y no requieren componentes adicionales.

Multiplexor de 2 Mbit/s

Otro ejemplo de industrialización es el multiplexor de 2 Mbit/s de nueva generación desarrollado por Alcatel Bell Telephone. Para conducir el proceso de industrialización en la etapa inicial de diseño se creó un equipo de diseñadores y técnicos de industrialización, incluyendo especialistas en instalación, que además trabajaban en la misma oficina para lograr una estrecha cooperación. La efectividad del diseño del producto se midió regularmente como una función de todos los costes (producción de piezas sueltas, ensamble, pruebas, instalación) orientada a conseguir el mínimo coste global posible sin sacrificar la calidad. Los aspectos de adaptación y cambios de costes individuales fueron examinados con sumo cuidado. Se redujeron sustancialmente los costes de prueba mediante el rediseño de circuitos, lo cual pese a aumentar el coste de los componentes se tradujo en un importante ahorro en el coste global.

El soporte lógico no modificable del controlador incorpora en sí unos programas de pruebas para ejercitar todas las funciones del equipo, lo cual además de facilitar las pruebas en fábrica las simplifica considerablemente en la instalación. Puede conectarse al equipo instalado un ordenador personal para leer los resultados de la prueba y enviar las órdenes correspondientes.

Los distintos módulos funcionales (en este caso multiplexores de 2 Mbit/s) pueden conectarse fácilmente al cuadro utilizando piezas mecánicas especialmente diseñadas, lo que facilita el ensamble de bastidores y las ampliaciones. Otra característica del diseño que simplifica y acelera la instalación es el uso de cableado frontal para suprimir un nivel de interconexión entre la placa y el panel posterior.

Gracias a las medidas adoptadas para industrializar el producto y a la estrecha cooperación de todas las especialidades involucradas, se cumplieron sobradamente los objetivos de coste.

Cuadro multiplexor diseñado para simplificar el ensamble y la ampliación.

Conclusiones

En el entorno comercial de hoy, cada vez más competitivo, es esencial una introducción de nuevos productos temprana y rentable. Para conseguir estos objetivos es fundamental una estrecha cooperación entre las diferentes disciplinas técnicas. Además, el producto debe responder a unos rigurosos criterios de aceptación para que se autorice su fabricación. No se debería dejar nada sin cuestionar ni dar nada por supuesto.

El uso de más herramientas en las áreas de diseño y fabricación ciertamente mejorará la industrialización del producto, pero no por eso dejarán aquéllas de ser simples

instrumentos. La buena cooperación entre las diferentes funciones y el dedicar la necesaria atención a todos los aspectos de un producto industrial son los factores más importantes, incluso en un mundo donde la tecnología está en constante evolución.

Dominique Maulay nació en 1950 en Orléans, Francia. Se graduó en la Universidad de Grenoble e ingresó en Alcatel CIT, donde inicialmente trabajó en métodos y equipos para las pruebas de sistemas de transmisión. Actualmente el Sr. Maulay es responsable de ingeniería industrial y tecnologías avanzadas de pruebas para los productos de transmisión de Alcatel ATC.

Jos Verspecht nació en 1945 en Merchtem, Bélgica. Se graduó ingeniero electrónico en la Universidad de Lovaina, y en 1979 obtuvo un MBA de la Universidad de Boston. En 1970 el Sr. Verspecht ingresó en Alcatel Bell Telephone, donde ha ocupado una serie de posiciones en ingeniería y en desarrollo de equipo y soporte lógico del Sistema 12. Actualmente es responsable de la introducción de productos en el proceso de fabricación, así como de los nuevos procesos de fabricación.

Fabricación asistida por ordenador, sistemas de fabricación flexible, y simulación

La creciente complejidad de los productos modernos requiere abordar la fabricación de un modo más flexible con el fin de obtener costes de producción mínimos y máxima fiabilidad. La fabricación integrada por ordenador, la simulación de la producción y los sistemas de fabricación flexible contribuyen a alcanzar estas metas.

P. Hurault
Alcatel ATC, Ormes, Francia
H. R. Kopa
Alcatel Austria, Viena, Austria
K. Kreft
Alcatel SEL, Stuttgart, República Federal de Alemania

Introducción

Alcatel está siguiendo nuevos caminos para atender las cambiantes y cada vez más complejas exigencias de la industria de producción de electrónica de alta tecnología. Uno de ellos consiste en el uso creciente de la informática para sustentar e integrar las diferentes áreas de una compañía, siendo CIM (fabricación integrada por ordenador) la denominación genérica de tales actividades. La parte de CIM que cubre el área de fabricación se denomina CAM (fabricación asistida por ordenador), y es una parte muy importante del concepto global. La figura 1 muestra cómo se integra el área de producción en el entorno CIM. Muchas de las ventajas que ofrece la CIM se consiguen en el dominio CAM, ya que la mayoría de la información generada en el sistema CIM (diseños, pedidos, configuraciones, pedidos de compra, etc.) tiene que acoplarse en la factoría para formar el producto final.

Un entorno CAM bien estructurado, provisto de las herramientas necesarias (por ejemplo, para simulación), es un factor clave para una implantación satisfactoria de los modernos criterios y tecnologías de fabricación. Dado que una instalación CAM es siempre específica de una actividad determinada, no es posible limitarse a comprar un sistema comercial completo. Cada compañía tiene que elegir elementos apropiados e integrarlos paso a paso, siguiendo ciertas líneas básicas, para obtener un entorno CIM que satisfaga sus necesidades. Dentro de Alcatel hay varios ejemplos de actividades CIM y CAM satisfactorias. Como ejemplo, Alcatel Austria, la primera en iniciar este enfoque en 1976, utiliza la siguiente estrategia:

- todo el soporte lógico del equipo (programas de control numérico, programas de prueba) se administra de modo centralizado y se almacena en la red, a fin de gestionar las versiones de programas, el almacenamiento de información, los derechos de acceso, etc.
- la información solamente se carga a petición de un usuario o proceso de fabricación a través de un sistema de realimentación
- toda información requerida del equipo se descarga de la máquina de producción a la base de datos de análisis, y todas las actividades de fabricación se anotan en un diario mediante un sistema de realimentación (ej.: quién está en la máquina, qué se ha hecho en un momento dado y cuál ha sido el resultado)
- la información extraída (realimentada) se utiliza en la base de datos de análisis para dar soporte a reacciones rápidas y potentes ante el sistema en la planta de taller, que permitan optimizar toda la fabricación y procesos asociados
- la información obtenida se distribuye a otras áreas de la instalación CIM
- el sistema se construye paso a paso, con una fase de consolidación tras realizar cada módulo, de tal modo que se consigan ventajas lo antes posible.

Tres factores principales contribuyen al éxito de una instalación CAM: el concepto de integración, la red y las herramientas.

Concepto de integración

Una instalación CAM consta de tres partes esenciales: una base de datos CAM, los interfaces con otras funciones de la compañía y un sistema de gestión de la información. Sólo la total integración de estas tres partes en el conjunto de la empresa aportará los beneficios esperados. Por tanto, la base de datos CAM debe ser parte de la base de datos CIM de la compañía entera. Esto no implica necesariamente que se construya una base de datos centralizada única; igualmente apropiada es una base de datos distribuida, aunque en tal caso la gestión de los datos debe estar bien coordinada.

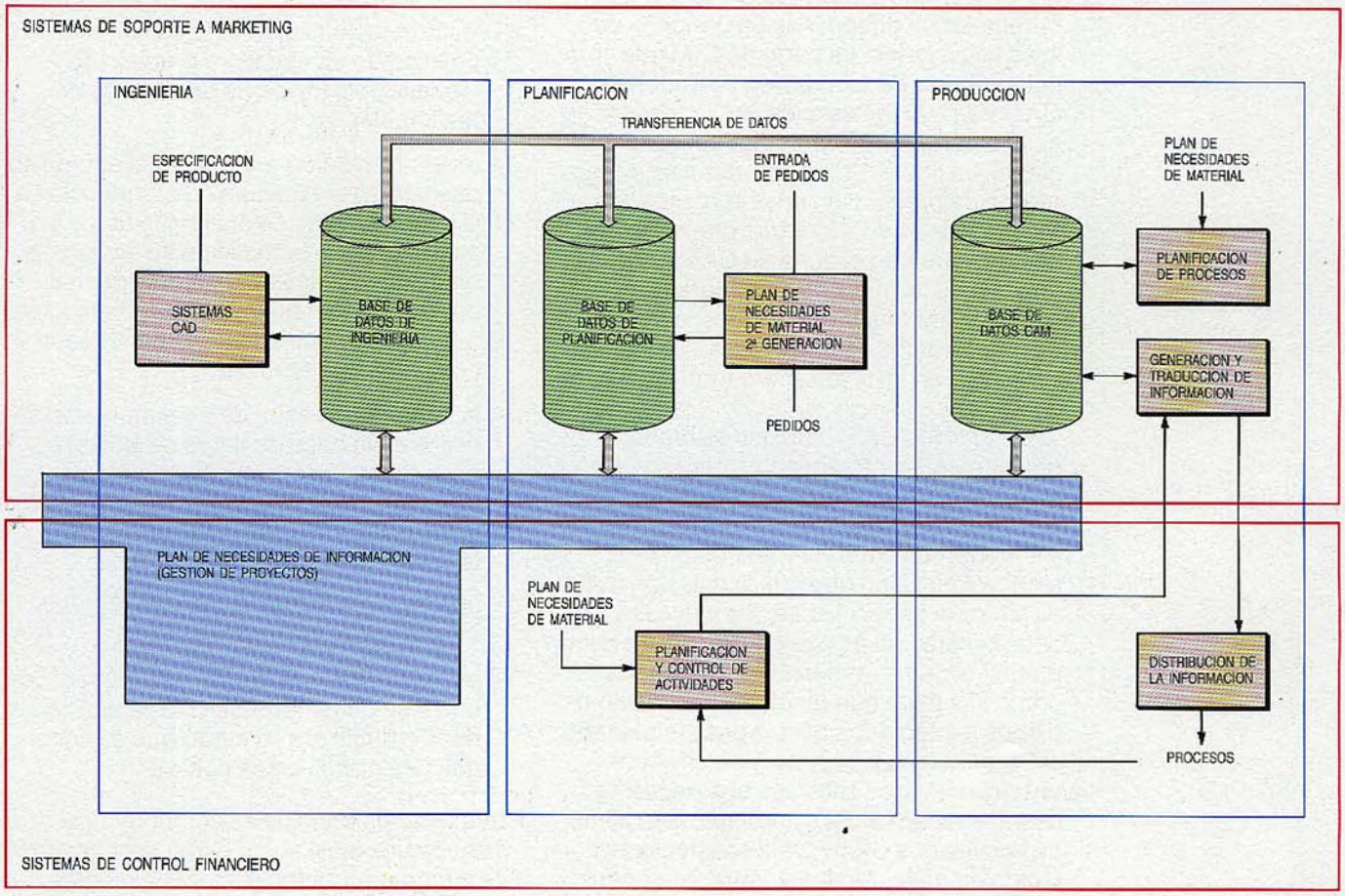
Todas las funciones de producción, tales como gestión de planta, ingeniería industrial, ingeniería de pruebas, control de calidad, mantenimiento, y control de la producción utilizan la base de datos CAM. Esta contiene toda la información técnica necesaria para la producción: programas de control numérico para máquinas de producción, programas de prueba, pedidos a la planta e información procedente del sistema de realimentación utilizada para construir la base de datos de análisis. Esta base de datos controla y optimiza la producción y, entre otras cosas, el mantenimiento de equipos.

Son importantes los interfaces con el área de CAD (diseño asistido por ordenador), donde toda la información técnica se transfiere a una base de datos CAM. La información transferida de CAD a CAM contiene detalles sobre la manera de realizar la producción y puede procesarse con herramientas adecuadas para proporcionar programas de control numérico y de prueba destinados a la planta de taller.

Existe otro interfaz importante con el sistema de pedidos a taller/sistema de planificación y programación de la producción, el cual proporciona al taller y al sistema de gestión asociado información sobre *qué hacer, dónde hacerlo*, y *cuándo hacerlo*, a través de un sistema de planificación y control de actividades. Otros interfaces con el área de administración – como los de soporte del cálculo y seguimiento de costes – y con las de marketing o distribución (por ejemplo, para gestionar el servicio postventa o construir productos configurados especialmente para un cliente) son parte de las herramientas de integración y brindan numerosas ventajas.

En el futuro, la gestión de la información será la clave de la función CAM, como se ilustra en la figura 1. La creciente complejidad de los productos provoca un rápido aumento de la cantidad y complejidad de la información CAM, y cada vez es más difícil

Figura 1
Modelo genérico CIM.



entregar a las máquinas de producción toda la información requerida en la versión correcta. Así, el operador de una máquina de inserción debe cerciorarse de que la versión del programa de control numérico corresponde a la versión del producto, para lo cual debe valerse de una herramienta o una función. La gestión de información se puede responsabilizar del control de las versiones, de controlar la disponibilidad de cualquier información y de la gestión eficiente de cambios en toda la empresa, incluyendo el área CAM.

Red CAM

El objetivo principal de la red, columna vertebral de una instalación CAM, es integrar toda la maquinaria importante de la planta (incluído el equipo de manipulación), el equipo de almacenamiento y los sistemas de transporte con un eficaz sistema de realimentación (de códigos de barras, por ejemplo), la base de datos CAM y otras funciones CAM, al igual que con otras áreas informatizadas de la compañía. La figura 2 muestra la conexión en red de área local CAM de las distintas áreas de fabricación, incluyendo aseguramiento de calidad y pruebas, y su integración en la instalación general CIM.

Otro objetivo es el de proporcionar a las actividades relacionadas la información que necesitan para garantizar unos procesos de planta óptimos en cuanto a tiempo de producción, costes y otros aspectos. Para conseguirlo, el supervisor dispone de un terminal que le da información detallada sobre el estado de la planta y las actividades proyectadas, facultándole para el control de la línea de ensamble o célula de trabajo.

Construir una red así implica relacionarse con muchos equipos distintos. Por desgracia, hoy en día las normas de interfaz más refinadas (MAP, por ejemplo) todavía no son utilizadas de manera general por los fabricantes de máquinas de producción, y por ello en numerosos casos grandes partes de la red han de construirse a base de "enlaces especializados", que suelen ser simples vías en serie punto a punto. La situación es peor para el soporte lógico de tratamiento de red, del cual ni siquiera hay normas fácticas por lo que cada fabricante utiliza sus propios protocolos.

Para evitar formar islas que no puedan integrarse en el sistema CIM, es necesario respetar ciertos principios:

- construir un sistema abierto compuesto de módulos funcionales e interfaces estándar, de manera que puedan satisfacerse exigencias de interfaces y módulos nuevos sin grandes reorganizaciones
- adoptar un modelo distribuido y jerárquico en el que se separen los nodos de área de los nodos de células de trabajo; definiendo las tareas relevantes para cada nodo de célula de trabajo, nodo de área de trabajo y nodo de planta, es posible que un tipo de nodo opere de manera autónoma durante cortos periodos en caso necesario
- incluir funciones para la gestión centralizada de la información
- formar una base de datos CAM integrada.

Una red como la descrita aporta beneficios a corto plazo, que van en aumento al crecer la integración.

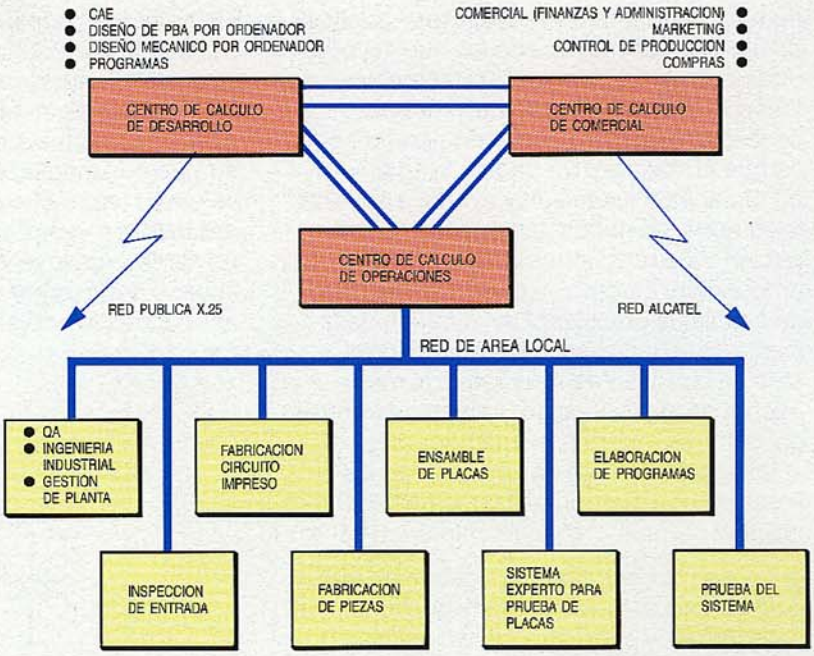


Figura 2
Red CIM mostrando la estructura básica de la red de Alcatel Austria que actualmente integra más de doscientas máquinas de producción.
CAE – ingeniería de aplicación
QA – aseguramiento de calidad

Herramientas en CAM

La creciente complejidad funcional tanto de productos como de maquinaria de fabricación conlleva la necesidad de más herramientas, que a su vez se van complicando. Aunque generalmente se necesiten diferentes herramientas para distintas funciones, existe una clara tendencia hacia la integración. Así, las herramientas de diseño interesan también en la fábrica (ingeniería de pruebas, ingeniería industrial, etc).

Simulación de las actividades de taller

En la planta de taller, el flujo de producción es cada vez más rápido, tomando como principal objetivo *tiempo de entrega cero, trabajo en curso cero*. El aumento del

número de máquinas propicia los "cuellos de botella". La mayoría de las nuevas organizaciones pretenden implantar técnicas de fabricación flexibles, y por ello deben dimensionarse para que el equipo no se cargue al máximo. De hecho, si se quiere controlar esta evolución y ayudar a superar tales retos, se necesita saber más sobre el trabajo y las reacciones de las líneas de producción. Es preciso pues ser capaces de simular la organización y gestión de la planta de fábrica para determinar cómo afectan las distintas soluciones al rendimiento de la producción: tiempos de entrega, tiempos muertos de máquina, etc.

La simulación señala con claridad las áreas en que pueden utilizarse herramientas para mejorar el rendimiento en el futuro:

- las nuevas herramientas deben ayudar a la gente a estudiar, prever y gestionar sus recursos, y además a lograr una visión más objetiva de sus problemas
- las personas responsables de resolver problemas tienen que saber aprovechar las nuevas herramientas en un entorno adecuado para obtener respuestas a las preguntas oportunas.

Todo esto influirá en el desarrollo de herramientas de modelación de uso cómodo que proporcionen resultados de fácil comprensión, así como en la integración e instrucción del personal de producción en los procedimientos de organización y gestión. Por consiguiente, es necesario evitar problemas clásicos en estas materias, como es la elaboración de herramientas ultrarrefinadas de perfecto funcionamiento pero que sólo pueden manejar los expertos, las cuales dividen el personal en dos categorías: los que utilizan las herramientas y los que tienen problemas que solucionar.

Campo de aplicación y ventajas

La simulación puede aportar mejoras útiles siempre que se desee contestar objetivamente a las preguntas sobre organización y gestión, en lugar de basarse en experiencias o aproximaciones. La simulación puede resolver problemas como los siguientes:

- dimensionado de sistemas de transporte, almacenamiento, número de estaciones de trabajo, etc.
- selección de reglas para secuenciar los pedidos, de modo que se optimicen los tiempos de entrega y la utilización de máquinas
- tratamiento de los inevitables "fallos" de equipos o de personas
- realización o combinación de técnicas de "salida-entrada" para gestión de planta.

La mejor atención a estas cuestiones ha producido ya beneficios tangibles en cuanto a costes y rendimiento de la planta, y se han minimizado las inversiones que exigen las nuevas estructuras organizativas al asegurar que no se desaprovecha la capacidad, se utiliza mejor el equipo costoso, y se reducen los tiempos de entrega, el trabajo en curso y los inventarios. En cada caso, el usuario debe lograr un compromiso óptimo entre todos los objetivos que quiere alcanzar.

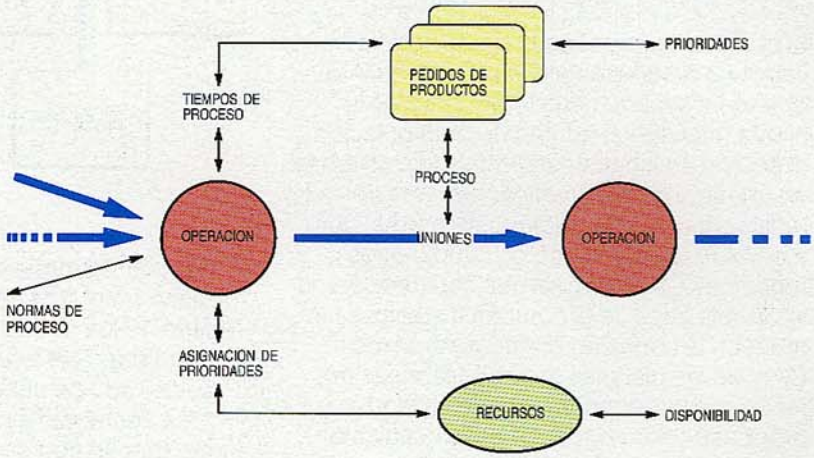


Figura 3
Descripciones estáticas y dinámicas de una organización de producción.

Principios para herramientas de simulación

Simular es imitar el comportamiento de una organización productiva, describiendo dos aspectos de los productos y recursos:

- descripción estática: cantidades de productos, recursos y sus posibilidades, operaciones y sistema de transporte
- descripción dinámica: proceso, tamaño de lotes, secuencia de pedidos a la planta, prioridades, tiempos de operación y transporte (Fig. 3).

Los programas de simulación se valen de esta descripción para realizar, una a una y en la secuencia correcta, cada actividad elemental del proceso y simular el paso de cada producto por todos los recursos del sistema de producción. Por lo tanto, en cada instante, y en particular al final del periodo simulado, se dispone de una serie de datos útiles:

- colas de productos que esperan ser procesados
- porcentaje de utilización de los recursos durante el periodo simulado
- porcentaje de tiempos de preparación y de proceso para las principales máquinas

– tiempos de entrega de los pedidos para toda la línea de producción o parte de ella.

Soporte lógico apto para usuarios

Anteriormente, los programas de las herramientas de simulación se escribían en lenguajes especiales ejecutables en miniordenadores, por lo que se necesitaba un especialista en simulación para modelar el sistema u organización y obtener resultados del modelo. Ello generalmente requería demasiado tiempo y prolongadas discusiones con las personas encargadas de resolver los problemas, para quienes las herramientas de simulación eran casi inaccesibles.

Desde 1987 existen macrolenguajes para microordenadores, y se han elaborado nuevos interfaces hombre-máquina que hacen innecesario un largo adiestramiento especializado en modelación. Los modelos de hoy se asemejan a la estructura física de la línea de producción (Fig. 4). Hay visualizadores de gráficos, listas de figuras ordenadas y resúmenes de resultados (utilización porcentual de las máquinas, tiempos de entrega, tiempos de preparación), que indican claramente las consecuencias de distintos casos de simulación (Fig. 5). Por todo ello se tarda ahora mucho menos en modelar procesos de producción y en obtener conclusiones de la simulación. Los usuarios idóneos (ingeniero industrial, técnico en logística, director de planta) son capaces de utilizar la simulación como instrumento para resolver sus problemas.

Ejemplo práctico

Considérese un caso típico, una línea de inserción automática de componentes con cuatro estaciones de trabajo que producen *X* tipos de productos al día, siendo *Y* piezas el tamaño medio del lote. Los productos siguen diferentes rutas por la planta, y los pedidos son de cantidades distintas. El tiempo de proceso de las placas depende del número de componentes y de la velocidad de inserción de la máquina (Fig. 6). La secuencia de pedidos es un parámetro que ha sido variado durante la simulación.

Los resultados indican que se produce cuello de botella en diferentes máquinas y que el número de productos en tal situación varía durante el periodo de simulación; también que la utilización de la máquina no es satisfactoria pese a trabajar en dos turnos.

La ordenación secuencial es la causa principal del deficiente aprovechamiento de las máquinas. En este ejemplo, la simulación reveló que una mejor combinación de pedidos grandes y pequeños podría incrementar la utilización de las máquinas en un 20% como promedio. Otro fruto importante de la simulación fue el introducir un segundo turno de trabajo selectivo (solamente en determinadas máquinas) para eliminar los atascos, lo cual redujo en un 25% el tiempo total de entrega de la línea automática de producción.

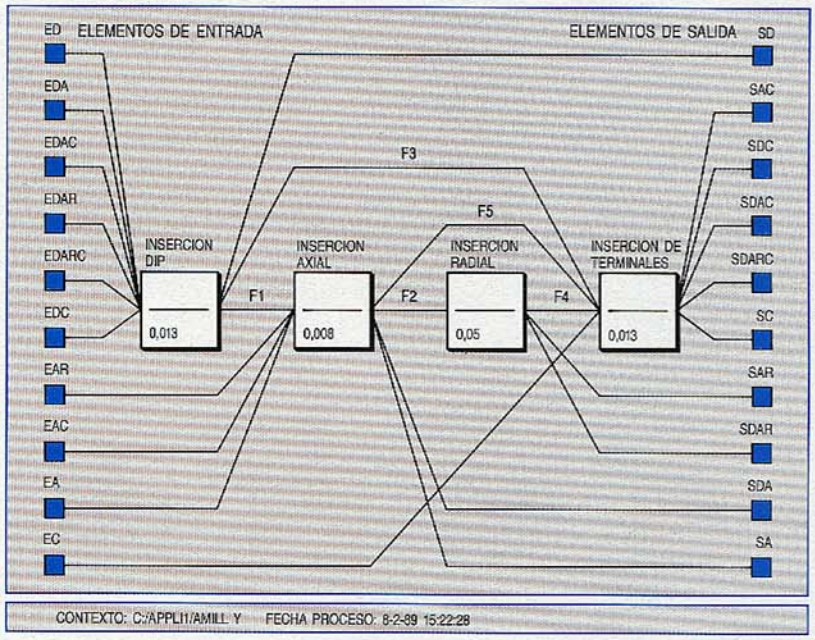


Figura 4
Modelo de ordenador que ilustra la disposición física de una línea de producción.

Evolución de las herramientas de simulación

El actual soporte lógico pone la simulación al alcance de los ingenieros y encargados de planta. Las herramientas de simulación del mañana permitirán modelar distintos

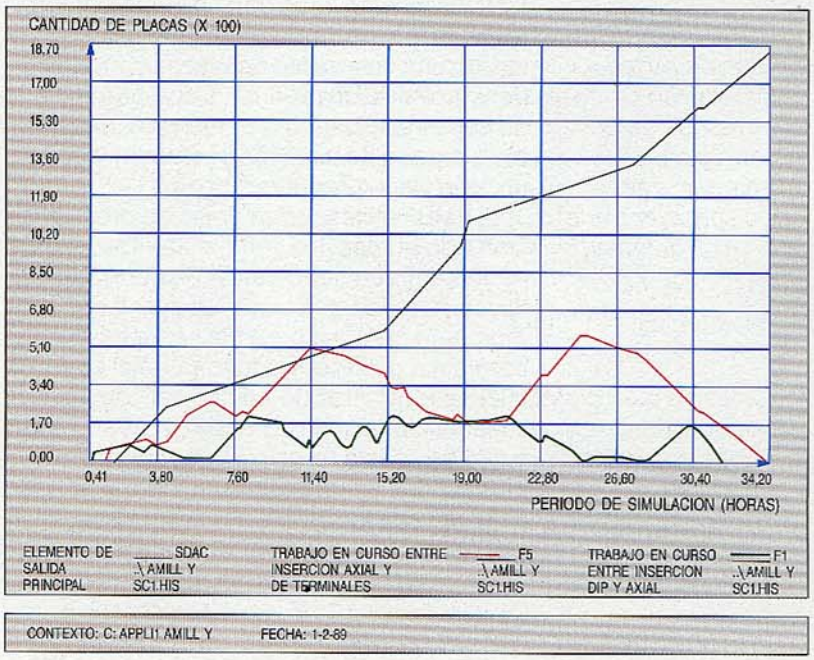


Figura 5
Resultados de tres posibles casos de simulación.

niveles de la producción (línea, taller, unidad, compañía) al nivel de detalle apropiado. Serán más abiertas y menos específicas para admitir la evolución de las reglas de gestión, recursos y procesos dentro de la empresa, y emplearán el sistema de información existente (base de datos CIM). Las nuevas herramientas utilizarán técnicas de programación orientadas al objeto e interfaces de manejo agradable.

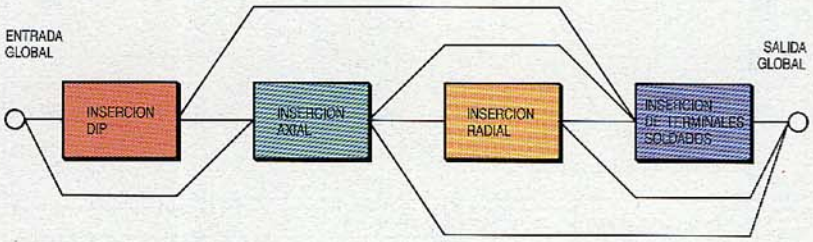


Figura 6
Velocidad de inserción.

CAM en uso práctico

Integradas todas estas tecnologías en un entorno de trabajo CAM, una factoría puede implantar económicamente filosofías de fabricación modernas. Por ejemplo, los sistemas de fabricación flexible (FMS, flexible manufacturing system) pueden suprimir las raíces del problema, que son el exceso de trabajo en curso y el exceso de elementos terminados con sus costes anejos.

Sistema de fabricación flexible

Un FMS es un conjunto integrado, controlado por ordenador, de manipuladores automáticos y estaciones de trabajo de control numérico, capaz de producir simultáneamente una diversidad de piezas o módulos de una familia de productos comprendida en sus posibilidades (por ejemplo, ensamble y prueba de circuitos impresos), según un calendario predeterminado.

El FMS utiliza herramientas de programación y de equipo, así como materiales (componentes) que deben estar disponibles en la estación de trabajo adecuada, en el momento apropiado y en la secuencia correcta. La diferencia fundamental con cualquier otro tipo de unidad, tal como una línea de fabricación automática, es su capacidad de aceptar piezas o módulos para procesarlos en un orden aleatorio. En otras palabras, el FMS está diseñado para fabricar cualquier producto de una determinada familia, en cualquier orden. En consecuencia, representa la mejor solución para la fabricación de productos en pequeñas a medianas cantidades y cuyo coste de material sea grande, ya que ofrece la flexibilidad requerida para implantar el principio de "justo a tiempo", que reduce al mínimo los tiempos de entrega y los inventarios.

Arquitectura FMS

La figura 7 muestra la arquitectura genérica de un FMS para operaciones de ensamble y prueba. Consta de los seis subsistemas siguientes:

Equipo de fabricación: equipos de producción, pruebas y reparación disponibles en el mercado (manuales, semiautomáticos o automáticos), integrados en una red informatizada y permitiendo rápidos cambios de herramientas y programas.

Sistema de transporte: cintas transportadoras, vehículos autoguiados, o manipuladores automáticos que transfieren el producto a las estaciones de trabajo individuales siguiendo la ruta especificada e interconectan las estaciones de trabajo de una célula FMS. Un sistema integrado de realimentación por código de barras, que identifica el producto e informa de su posición al ordenador central es esencial para esta tarea.

Almacenes intermedios (buffers): almacenes integrados en la línea de producción, gobernados por ordenador, que contienen una cantidad limitada de los productos en fabricación con miras a equilibrar el flujo de los mismos; este flujo se controla tomando su estado como referencia.

Materiales para fabricación: almacén de material previo a la fabricación, estrechamente unido a la planta para poder retirar los materiales con rapidez.

Sistema de ubicación/gestión de materiales: sistema para asignar materiales a estaciones de trabajo y transferir los conjuntos correspondientes a las estaciones dentro de una célula FMS.

Sistema de control: red jerárquica de ordenadores y máquinas programables (red CAM) con un ordenador como unidad central de control para transferir información entre todos los niveles de la red y ofrecer interfaz con las funciones (ventas, control de calidad, etc.) y bases de datos.

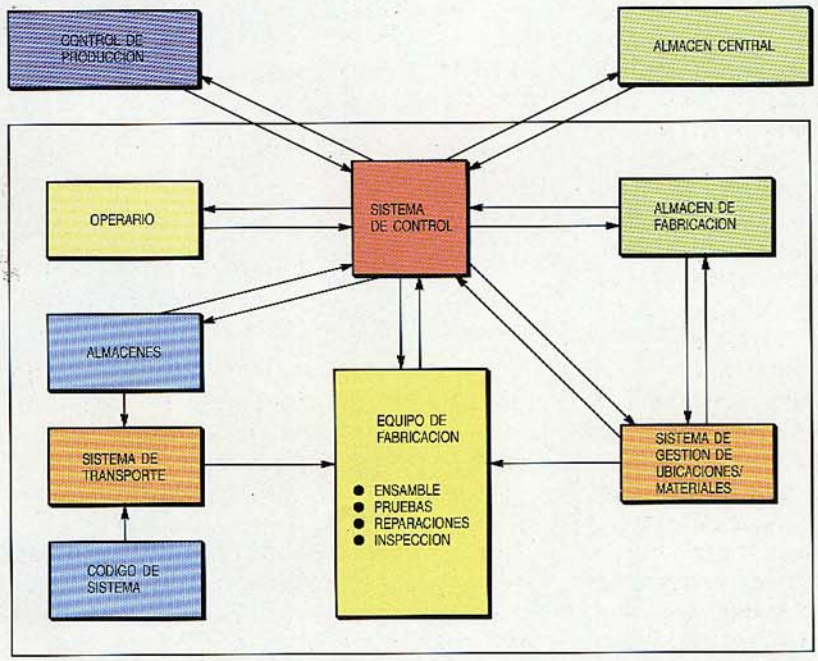
El FMS es parte integrante del CIM descrito en la figura 1. Su operación eficaz depende en gran medida de elegir las estrategias adecuadas para gestión de ubicaciones, preparación del material (p. ej., cortar y preformar terminales de componentes), formación de conjuntos de material para las estaciones de trabajo y organización del flujo de materiales (prioridades, rutas) dentro de la célula de trabajo FMS.

Asignación de ubicaciones FMS
Requisito previo para la fabricación flexible es la disponibilidad de materiales en la estación de trabajo adecuada en el momento oportuno y con la secuencia correcta. Una manera de conseguir esta meta es el llamado *establecimiento de ubicaciones fijas*, lo que significa que todos los materiales necesarios para una gama de productos completa permanecen en las estaciones de trabajo de la célula FMS. Este método es adecuado para pequeñas familias de productos construidos con un número limitado de componentes diferentes.

De todas formas, dada la gran cantidad de componentes distintos (a veces más de 5000) y el corto número de ubicaciones – localizaciones físicas de un determinado componente en una estación de trabajo – de material posibles en las máquinas comerciales, se necesitarían demasiadas máquinas para fabricar simultáneamente un gran número de piezas o módulos en el FMS. En particular, para el ensamble de circuitos impresos, esenciales en los productos electrónicos modernos, este método es prohibitivo debido a la enorme inversión de capital requerida.

Por otra parte, los cambios frecuentes de ubicación del material aumentan los tiempos inactivos de las estaciones de trabajo y obstaculizan seriamente el flujo de productos, dificultando así el objetivo primordial del FMS, lograr cortos tiempos de entrega. Una solución mejor es amalgamar los procedimientos de ubicación fija y ubicación flotante, en el supuesto de aplicar un ciclo de fabricación (día o turno) más corto, lo que daría lugar a una relativamente pequeña familia de productos, cuyas necesidades de ubicaciones pueden satisfacerse económicamente con una célula FMS. El material para tal familia de productos se asigna a las ubicaciones disponibles en la célula FMS mediante un procedimiento "inteligente"; dichas ubicaciones quedan fijas durante el programa de fabricación (por ejemplo, un día), con la ventaja de que sólo ha de prepararse la estación de trabajo una vez por cada periodo de fabricación y se dispone del material siempre que se necesite.

Figura 7
Arquitectura de un sistema de fabricación flexible.



Preparación y formación de conjuntos de material para FMS
La asignación de material a ubicaciones, que prácticamente determina el espectro de material para cada una de las estaciones de trabajo de la célula FMS, da los datos para la preparación y formación de conjuntos de material. Esto implica retirar del almacén, poco antes de comenzar el periodo de fabricación definido (un día, por ejemplo), todo el material necesario para el mismo y formar con ese material los conjuntos destinados a las estaciones de trabajo. Se sigue un método eficaz para eliminar cualquier almacenamiento intermedio del material entre su extracción, preparación y disposición en conjuntos.

Funcionamiento de la célula FMS
La preparación de las estaciones de trabajo FMS con los conjuntos de material para un nuevo periodo de fabricación se inicia por la estación que primero termine su programa en este periodo, sin esperar a que terminen las demás estaciones de la célula. Para evitar tiempos muertos, los productos que se fabricarán en el periodo siguiente se llevan a la célula FMS que ya tenga material en una estación de trabajo al menos. Una vez completada la composición, el FMS queda dispuesto para aceptar productos según las secuencias (prioridades) predeterminadas.

El flujo de material se controla con referencia al estado de los almacenes (buffers) de las estaciones de trabajo que contienen las piezas en fabricación. Se dirige un producto a una estación si el almacén de ésta y el de la siguiente tienen alguna posición vacía. Este algoritmo optimiza el flujo de material, ya que un producto nunca puede bloquear el sistema de transporte y la capacidad de las estaciones de trabajo se utiliza al máximo.

Las estaciones de inspección y prueba integradas, conectadas a estaciones de reparación, son importante atributo de una célula FMS eficiente. No sólo dan información inmediata de las faltas a fin de poder ejercer acciones correctoras, sino que

aseguran la ausencia de defectos en los productos entregados a la siguiente etapa de fabricación o directamente al usuario.

Requisitos de soporte

Como el FMS requiere planificarse en ciclos cortos para explotar plenamente su flexibilidad, es necesario generar información de fabricación – asignación de ubicación al material, obtención del material, preparación y formación de conjuntos, instrucciones a las estaciones – que se ajuste a estos ciclos. Se deben generar programas adecuados para hacer funcionar las máquinas de producción diariamente, e incluso más a menudo, dependiendo del último estado de material en existencias, productos y células de trabajo FMS. Por descontado que la disponibilidad de material, información del producto y la capacidad de fabricación son condiciones previas para la ejecución de un programa de trabajo planificado.

Conclusiones

Para permanecer con éxito en un mercado cada vez más competitivo son esenciales la mayor productividad, menores costes y mejor calidad del producto, y unos tiempos de reacción cortos a las peticiones del cliente. El CAM, parte integrante del concepto CIM, unido a conceptos modernos de fabricación como el FMS, puede reducir al mínimo el trabajo en curso y lograr unos tiempos de entrega breves y una rápida respuesta a las demandas cambiantes del mercado, todo lo cual es la base de una fabricación rentable de los productos modernos, por pequeño que sea el tamaño de los lotes. En otras palabras, el FMS es un instrumento de gestión eficiente de material e inventario, y como tal imprescindible para una fabricación "justo a tiempo".

En vista de la complejidad del flujo de material y de información que requieren estos sistemas, se necesitan herramientas de simulación para definir los procedimientos óptimos y verificar la viabilidad de un concepto de fábrica proyectado para evitar desastres económicos. Estos conceptos avanzados de fabricación son los pilares del éxito futuro de una empresa, especialmente en la industria de la electrónica.

Patrick Hurault nació en 1945. Su formación básica es la ingeniería mecánica, pero actualmente trabaja en organización y gestión de producción. Inicialmente tuvo a su cargo un grupo responsable de organización de la planta y preparación de procesos, tras lo cual pasó a ser consultor del Centre d'Etudes Industrielles, subsidiario de la CGE. El Sr. Hurault trabaja ahora en la división ATC de Alcatel CIT, donde es responsable de organización y gestión dentro de las unidades de ingeniería industrial y desarrollo de la producción.

Helmut R. Kopa nació en Viena, Austria, en 1951. Estudió comunicaciones eléctricas y electrónica en el Technologisches Gewerbemuseum de Viena, y se incorporó a Alcatel Austria en 1971, donde se encargó del desarrollo de equipos de prueba, al principio como ingeniero de desarrollo y luego como jefe de grupo. En 1975 empezó a crear la red CAM de la compañía y desde entonces ha tenido a su cargo la ingeniería de pruebas. El Sr. Kopa es actualmente responsable de CAM en Alcatel Austria, y desde 1983 también ha sido su representante en cuanto a CIM en la organización AMTC.

Klaus Kreft nació en Stettin, Alemania, en 1941. Se graduó en ingeniería de procesos en la Academia Técnica de Isny en 1967, y al año siguiente se incorporó a SEL, donde inicialmente trabajó en la planta de fabricación de circuitos impresos. Años después fue nombrado jefe del LEAP2 Manufacturing Coordination Centre de ITT Europe. Posteriormente se incorporó al AMTC como responsable de las tecnologías de fabricación avanzadas. Actualmente, el Sr. Kreft es responsable de proyectos de factorías y de transferencia de tecnología en la división de conmutación de Alcatel SEL.

Sistemas de planificación y control de fabricación

El sistema de planificación de recursos de fabricación MRP II, utilizado por todas las compañías importantes de Alcatel para planificar y controlar la fabricación, ha aportado notables mejoras en la eficacia operativa. Originalmente concebido para la previsión y control de los recursos de fabricación, sirve ahora de plataforma para una ulterior integración de todos los procesos relacionados con un pedido del cliente.

F. Bolay
Alcatel STR, Zurich, Suiza
A. Waldraff
Alcatel SEL, Stuttgart, República Federal de Alemania
A. White
Alcatel Coordination Centre, AMTC, Zaventem, Bélgica

Introducción

Para mejor comprender el objeto de este artículo, imaginemos que se desea preparar un determinado plato de comida. La receta indica los ingredientes necesarios y el tratamiento requerido. Las herramientas de una cocina (sartén, cacerolas, cucharas) son en su mayoría genéricas, suponemos que están disponibles y que es suficiente la capacidad. Asimismo, los productos obtenidos han de ser estables y se debe prever con razonable precisión su demanda.

Utilizando esta información – lista de materiales, órdenes de manejo (o distribución) y lista de otros recursos y herramientas requeridas – sabremos exactamente los pasos a dar para servir el referido plato "justo a tiempo", por ejemplo, el viernes a las dos de la tarde. A partir de esta fecha y hora obligada y programando hacia atrás, se determina el momento en que debe realizarse cada operación. Si faltara cualquiera de los ingredientes de la receta habría que incorporar al plan el tiempo necesario para adquirirlo en la tienda, y en tal caso el departamento de aprovisionamiento puede comunicarnos que existen descuentos cuando la compra rebasa cierta cantidad, lo que nos obliga a tomar decisión al respecto. Naturalmente, cuando se trate de un ingrediente esencial (carne, pescado, etc.) su aprovisionamiento se dirigirá a completar la cantidad que exige la receta; en cambio, cuando el elemento es de uso continuo, como la sal y la pimienta, su compra se realiza simplemente para reponer un cierto nivel mínimo en almacén, siempre respondiendo a la información que procede del control de inventarios. Esta última técnica, llamada punto de reaprovisionamiento, y todas las demás técnicas de planificación de materiales basadas en el *consumo* nos indican lo que probablemente vamos a necesitar en el futuro, en el supuesto de que mantengamos pautas de consumo similares a las actuales. Por el contrario, una planificación *por demanda* calcula los elementos que deben comprarse o producirse para satisfacer determinada demanda con ayuda de una lista de materiales y de la información de las existencias disponibles. En general, las técnicas basadas en el consumo son sencillas pero corren el riesgo de hacer crecer los inventarios, mientras que las basadas en la demanda requieren bastante más información y cálculo pero en teoría podrían aplicarse sin ningún almacén en inventario.

En la vida real uno probablemente no guisa su propia comida, sino que alguien lo hace por encargo nuestro, y entonces habrá que dar las órdenes oportunas. Así, en la fábrica, habrá que editar órdenes de trabajo para el taller, requisiciones de material a compras y suministradores, órdenes de acopio de piezas para el personal de almacenes, órdenes de transporte para el departamento de expediciones, y así sucesivamente. Por desgracia, la vida rara vez es sencilla, y una vez editadas todas esas órdenes puede modificarse la demanda que les dio origen. Así, si exigimos de la cocina anticipar en dos horas nuestra comida podemos tropezar con una respuesta airada, y algo análogo sucedería en el mundo de la fábrica. Es pues necesario registrar las órdenes o pedidos que se han editado y disponer de rutinas que permitan cambiar el tiempo de realización (e incluso

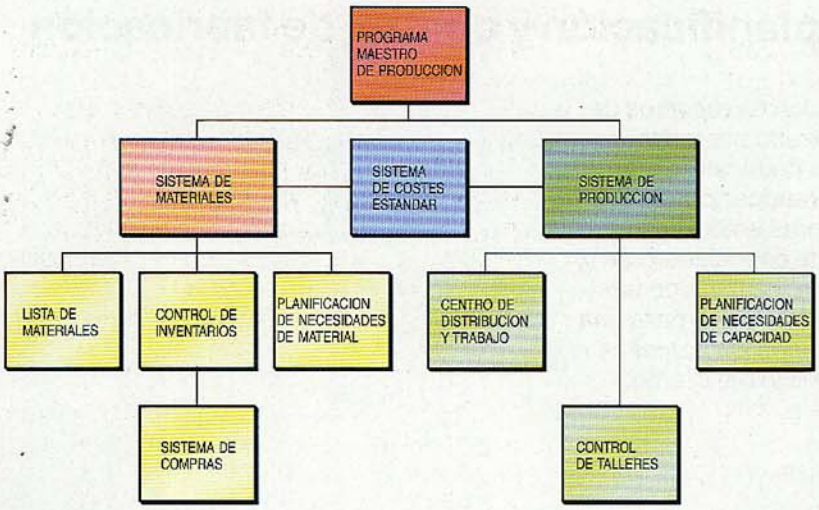


Figura 1
Sistema de planificación de recursos de fabricación que adopta una configuración de módulos típica.

el contenido) de cada una de ellas, sometiendo tales rutinas a pruebas comparables a cambiar en nuestro imaginario plato unos macarrones a la italiana por una tortilla de patatas.

Perspectiva histórica

Dada la generalidad de estos problemas, tanto en la vida privada como en la industria manufacturera, una de las primeras aplicaciones de fabricación desarrolladas para ordenadores en los primeros años 60 fueron los sistemas MRP (planificación de las necesidades de material), que utilizaban un programa de demanda o un plan "maestro de producción", un juego de listas de material y un fichero con los registros de inventarios. Antes de introducir los sistemas MRP, la planificación y el control de inventarios se basaba en una mezcla de técnicas estadísticas (p. ej., volúmenes rentables para pedidos, previsiones, puntos de reaprovisionamiento) generalmente aplicadas a piezas de bajo coste y uso frecuente, y en cálculos manuales basados en la lista de materiales para los elementos costosos específicamente utilizados en la fabricación de un pedido. A menudo el método seguido para una pieza concreta se apoyaba en una *clasificación de inventario* determinada por su valor y uso en el pasado.

Durante los últimos diez a quince años los sistemas MRP fueron cubriendo un mayor número de funciones para planificación y control de los recursos de fabricación de una compañía, y en particular los que no son materiales, como capacidad y herramientas. Este desarrollo fue emprendido por importantes compañías de fabricación para su propio uso y por vendedores de equipo informático para sus clientes. Las compañías más pequeñas, incapaces de costear el desarrollo de un sistema propio, recurrieron a empresas de informática independientes para elaborar aplicaciones a su medida.

Finalmente y bajo los auspicios de las Asociaciones de Producción y Control de Inventarios de EE. UU. y Europa, se logró un consenso general sobre las funciones requeridas, acuñando el término "planificación de los recursos de fabricación" (MRP II) para describirlas. Varias compañías Alcatel estuvieron en vanguardia de este desarrollo y participaron estrechamente en definir la funcionalidad genérica del MRP II.

Hoy día, numerosos vendedores de programas independientes y consultores de gestión se especializan en el desarrollo, comercialización y soporte de estos sistemas. La mayoría de las compañías que implantan un MRP II o sustituyen un MRP podrían comprar un paquete informático "estándar" de este tipo.

Funciones del MRP II

Actualmente los sistemas avanzados de planificación de recursos de fabricación pretenden modelar el proceso de fabricación entero, incluyendo el aprovisionamiento de materiales y recursos e incluso la distribución física de las mercancías acabadas: es decir, la cadena de suministro completa, desde el vendedor al cliente.

A consecuencia del modo de evolución de los sistemas MRP II y de las limitaciones técnicas en equipos y programas impuestas durante el desarrollo, un MRP II se compone realmente de cierto número de sistemas o módulos distintos que se han acoplado para formar el sistema total. La figura 1 muestra un conjunto de módulos típico que constituye un sistema MRP II.

Programa maestro de producción
El programa maestro de producción (MPS), entrada primaria al MRP, es el plan de producción global del cual se derivan todos los cronogramas restantes. Por norma, el MPS contiene tanto los pedidos en firme del cliente como los previstos o en proyecto. Aunque su aportación al MRP parece limitarse a un simple registro de números de pieza con las cantidades a fabricar y las fechas en que deben estar preparadas, constituye la información más crítica de todo el proceso. Por lo tanto, el módulo MPS contiene normalmente funciones que ayudan a perfilar el programa y conocer sus implicaciones.

Una función de planificación de recursos evalúa el efecto de los cambios en el programa. Un posible enfoque consiste en el uso de perfiles de carga (resúmenes de

horas-hombre y horas-máquina necesarias para fabricar un producto) para ayudar a señalar cuellos de botella y recursos críticos en el proceso de fabricación, lo cual se realiza mediante simulación con sistemas avanzados.

También ayudan a mantener y controlar el MPS otras funciones, como las *barreras de tiempo* que impiden modificar el programa durante un periodo prefijado, y la *previsión del consumo* que permite absorber la cantidad prevista de un producto por los sucesivos pedidos recibidos de los clientes.

Uno de los aspectos críticos del MPS es la elección del nivel de fabricación para el que se establece: subunidades, equipos, sistemas completos, etc. Puede incluso ser ventajoso aplicar criterios comerciales como la capacidad y los servicios. Al no haber una regla general, la mayoría de las aplicaciones incluyen facilidades que permiten planificar el producto a cualquier "nivel". Para seleccionar tal nivel las compañías deberían tratar de usar un lenguaje común, comprensible por todos los departamentos implicados (sobre todo, marketing, fabricación, ingeniería y control), convirtiendo así el MPS en el programa común motor de la empresa.

Lista de materiales

La lista de materiales (*BOM, bill of materials*) es el módulo fundamental del MRP. Típicamente la fabricación de un producto se compone de una cantidad de procesos o "niveles de fabricación" distintos en los que, por ejemplo, la materia prima se transforma en piezas, éstas se utilizan para construir subunidades, y a su vez estas últimas sirven para formar unidades. En su versión básica, el BOM es un listado de todas las subunidades, piezas y materias primas requeridas para fabricar un producto. Tales listas, denominadas estructuras del producto, estan dispuestas jerárquicamente para mostrar los diferentes niveles de fabricación de un producto (Fig. 2). El plan de materiales se calcula desarrollando esta información mediante el programa maestro de producción.

Como parte de esta información, el sistema incluye medios para controlar los cambios en la lista de piezas mediante el registro junto a cada pieza de las fechas de efectividad; para una lista determinada, estas fechas especifican cuando empezará y cuando cesará el uso de la pieza, por ejemplo, cuando haya necesidad de sustituir una pieza por otra. El módulo *control de inventarios* se interconecta con el BOM para obtener la lista de materiales que debe editarse cuando se genera un pedido de producción para la fábrica. Este módulo proporciona una serie de facilidades de información y consulta que permiten al usuario observar los datos del BOM en diversos formatos, siendo los más comunes el formato BOM normal (piezas utilizadas para construir un producto) y el *dónde se usa* (productos que utilizan determinada pieza).

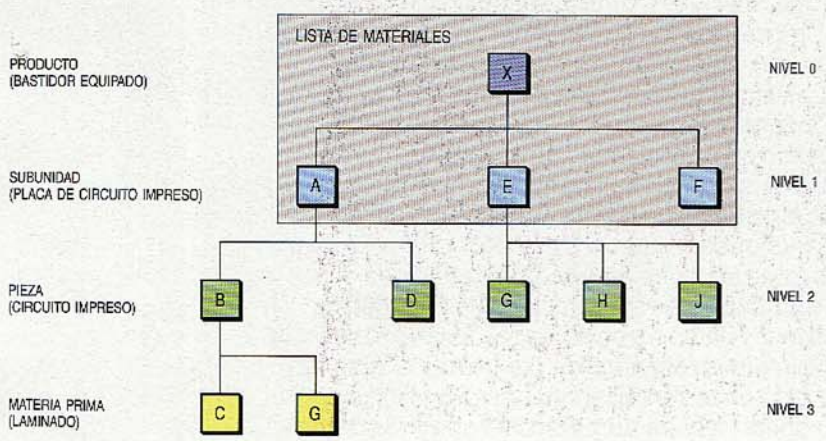
Centro de distribución y trabajo

Si bien el módulo BOM contiene las listas de materiales requeridos para fabricar un producto, el módulo *centro de distribución y trabajo* enumera las operaciones implicadas en la fabricación de tal producto. Se reseñan como operaciones cada una de las tareas, incluyendo transporte, inspección y prueba de la pieza, junto con el tiempo permitido para realizarla. Dentro del sistema cada operación se numera por su orden de ejecución, con información exacta sobre la herramienta, mano de obra, equipo y tareas requeridas para llevarla a cabo. Esto se denomina distribución o proceso de la pieza.

El módulo incluye también información que define las capacidades de los medios de fabricación disponibles. Cada zona (centro de trabajo) de la factoría recibe una identidad, y sus recursos junto con su capacidad teórica se definen en horas-hombre u horas-máquina. Por ejemplo, en el taller puede haber un centro de trabajo para taladrado, equipado con seis máquinas de 35 horas de capacidad cada una.

Dentro del sistema MRP II el *centro de distribución y trabajo* asume varias tareas. Así, proporciona al personal de taller la información necesaria para realizar la fabricación y les permite comunicar, a través del módulo *control de talleres,* el progreso del trabajo y el tiempo invertido. Tales datos pueden servir para determinar los pagos a realizar a los operarios. La información sobre el tiempo asignado a cada operación contenida en el *centro de distribución y trabajo*, la utilizan tanto el módulo *planificación de necesidades de capacidad* como el

Figura 2
Estructura jerárquica de la lista de materiales.



control de talleres para calcular la carga de trabajo futura expresada en mano de obra y máquinas, y además se aportan los necesarios datos sobre la capacidad del centro de trabajo a efectos de compararla con dicha carga.

Esta información puede utilizarse en conjunción con el BOM para calcular los costes estándar. También se dan medios para implantar cambios a través de las fechas de efectividad.

Control de inventarios

Este módulo registra información sobre la cantidad en existencias y bajo pedido de cada pieza. El sistema suele proporcionar medios para que una pieza pueda situarse en diferentes almacenes o en varias posiciones dentro de un almacén. Para entregar la cantidad objeto de pedido en las fechas prometidas se registran los pedidos individuales de fabricación y de compra de cada pieza.

Aunque separados funcionalmente, los módulos BOM y de control de inventarios comparten un *fichero maestro de piezas* que contiene los diversos parámetros de cada pieza: entre ellos el tiempo de entrega requerido para fabricarla o comprarla y las reglas que ha de utilizar el MRP cuando sugiere un pedido de esa pieza (clasificación por tamaño de lotes). Junto con el BOM, la salida principal del módulo son las listas para expedir materiales con destino a los pedidos de producción (formación de juegos de materiales) en el momento de su lanzamiento a la fábrica, y su principal entrada, las transacciones que registran la expedición de material.

Planificación de necesidades de material

Este módulo crea el plan de materiales para fabricación y aprovisionamiento de todas las piezas necesarias de acuerdo con el MPS. En esencia descompone el MPS a través de los BOM nivel por nivel, deduciendo en cada nivel el material en existencia o ya pedido con el fin de determinar qué cambios se necesitan en el plan de materiales para satisfacer el MPS. Utilizando las reglas de clasificación por tamaño de lotes y los tiempos de entrega procedentes del control de inventarios, estas necesidades netas se convierten luego a propuestas de cambio del plan de materiales actual, que pueden traducirse en lanzamiento o cancelación de pedidos de fabricación y requisiciones de compra, o en cambios de cantidades o fechas. En esta descomposición nivel por nivel, el sistema examina también las fechas de efectividad de los cambios de ingeniería para determinar qué piezas deben excluirse e incluirse en los BOM, y por lo tanto en el cálculo de MRP.

Planificación de necesidades de capacidad

Una vez determinado, de conformidad con el MPS, el plan de materiales que ha de dar soporte a la producción, es sencillo ampliar este plan mediante los factores de tiempo contenidos en el módulo de distribución para calcular la carga en horas-hombre y horas-máquina. Adviértase que el sistema no pretende programar los pedidos de acuerdo con la capacidad de la fábrica, sino que calcula la carga en horas necesaria para satisfacer el MPS (suponiendo una capacidad ilimitada). Dicha carga se compara luego con la capacidad dada por el centro de distribución y trabajo, con presentación gráfica de las sobrecargas o subcargas.

Si hay cuellos de botella (esto es, sobrecargas) que no puedan eliminarse por acción directiva, habrá que ajustar la carga modificando el MPS tras las oportunas consultas, por ejemplo con los clientes. A la inversa, el exceso de capacidad (subcarga) puede indicar que hay posibilidad de aumentar las ventas. El módulo *planificación de necesidades de capacidad* ofrece opciones para informar de la capacidad o carga a distintos niveles de detalle, que suelen referirse a periodos diarios, semanales o mensuales y a resúmenes por máquina, centro de trabajo o planta.

Control de talleres

El módulo descrito en el apartado anterior es una herramienta para planificar a medio y largo plazo cuando todavía es posible modificar el plan de materiales. No encara el corto plazo ni desciende al detalle requerido para controlar los pedidos de fabricación lanzados al taller. Esta tarea incumbe al módulo *control de talleres*, que utiliza la información dada por el centro de distribución y trabajo para calcular las fechas programadas de principio y fin de cada operación implicada en la fabricación de un pedido. A medida que se completa cada una de las operaciones, se realimenta información al sistema para que pueda seguirse el curso del pedido, actualizarse la carga de cada máquina y del centro de trabajo y calcular los datos sobre el rendimiento de máquinas y de explotación. En algunas compañías esta información sirve para determinar los pagos a los operarios. Igual que en planificación de necesidades de capacidad, existen diversas opciones para resumir o informar por excepción la vasta cantidad de detalles que puede haber.

Tal vez por el detalle que requiere la programación a este nivel y por la abundancia de los datos disponibles, el desarrollo de sistemas refinados de control de talleres ha sido un terreno favorito de la investigación operativa y de numerosos algoritmos de

optimización de colas, secuenciación, clasificación por tamaño de lotes y cosas semejantes.

Compras
Así como el módulo *control de talleres* ayuda a ejecutar los pedidos de fabricación de acuerdo con el plan, el módulo *compras* ayuda a ejecutar los pedidos de compra. En efecto, da soporte al departamento de compras en la confección del pedido, proporcionando información sobre los posibles suministradores y manteniendo el estado del pedido hasta que sea entregado al almacén. Numerosos sistemas contienen también funciones para cotizar, informar del cumplimiento de los suministradores, tratar las diversas opciones de pedido y manejar transacciones en múltiples monedas. Tales

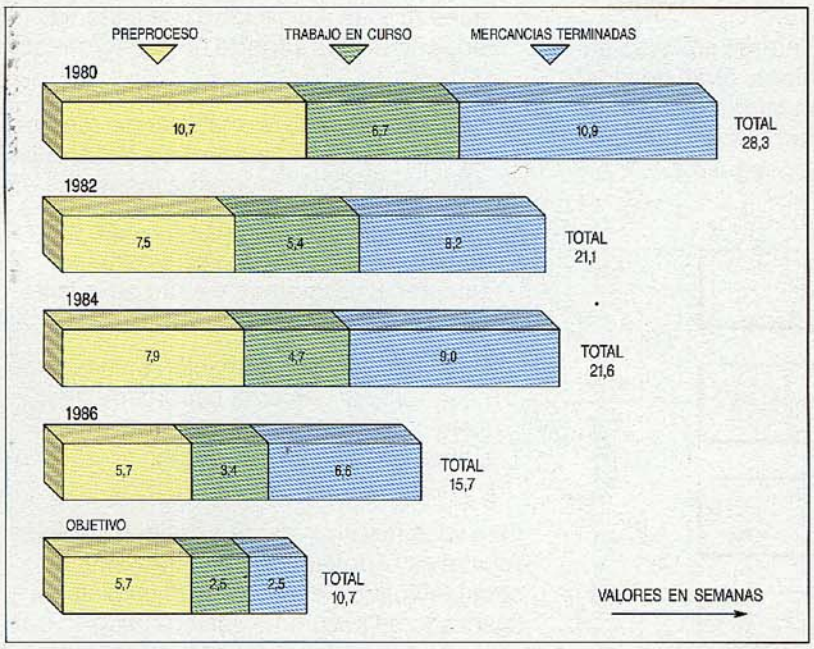


Figura 3
Reducción de la relación inventario a ventas desde 1980.

características cobran más importancia dada la estrategia de mantener estrechos lazos con los suministradores clave y sustituir el aprovisionamiento convencional por contratos marco en los que se suscribe un compromiso a largo plazo para adquirir material de un suministrador y después, mediante llamadas, especificar las cantidades a entregar y las fechas de suministro.

Módulo de costes estándar
Aunque no es estrictamente un módulo del MRP II, la función de costes estándar normalmente se incluye en el sistema. Al sistema pertenecen los módulos *BOM* y *centro de distribución y trabajo* requeridos para calcular los costes estándar, y en tales costes se basan gran parte de los parámetros e informaciones que da el sistema. El proceso que sigue el coste estándar es casi el inverso del proceso MRP: comienza en el nivel inferior del BOM y va acumulando paso a paso los costes del producto partiendo de los mismos datos estándar que el MRP.

Aplicación del MRP en Alcatel

El uso del MRP como recurso principal de planificación es casi universal entre las casas fabricantes de Alcatel: no todas ellas requieren la funcionalidad íntegra del MRP II, pero sí utilizan todas el proceso básico de planificación de materiales. Las que fabrican una gama de productos suelen aplicar para todos ellos el mismo sistema. Durante el tiempo que Alcatel lleva utilizando sistemas MRP ha habido grandes cambios de productos resultado de la evolución tecnológica, y en homenaje a tales sistemas hay que señalar que en la mayoría de las compañías un MRP único cubrió las necesidades de todos los productos a lo largo de la transición. Además, la índole genérica de estos sistemas ha permitido la transferencia de productos entre fábricas y compañías sin grandes trastornos en la producción.

Dentro de Alcatel, los sistemas MRP II controlaron en 1988 un valor total de inventarios próximo a 2600 millones de ECU, que comprendían materiales almacenados para producción (preproceso), productos en diversas etapas de fabricación (trabajo en curso) y productos completados (mercancías terminadas). Asimismo controlaron un tráfico de mercancías que ascendió a 7000 millones de ECU (en 1988), correspondientes al 85% del coste total de las ventas.

Muchos de los sistemas MRP se justificaron por ahorros en inventarios; aunque no se lograron ahorros en todos los proyectos, sí que ha habido una notoria reducción desde 1980 en la relación inventario a ventas. La figura 3 expresa en semanas los valores de esa relación (es decir, el valor actual dividido por el valor de uso semanal) en las diferentes categorías y la reducción obtenida. Además, se han percibido evidentes beneficios, tangibles e intangibles, fruto de la mayor disciplina que se necesita para lograr la precisión exigida por las operaciones de fabricación, y de la transparencia de datos que ofrece visibilidad sobre todos los aspectos de la fabricación a través de la información interna del sistema.

Con regularidad se están implantando sistemas para aprovecharse de las mejoras del soporte lógico (por ejemplo, bases de datos relacionales, facilidades de

simulación), o bien como resultado de cambios en el equipo físico del ordenador.

Un ejemplo reciente fue la implantación de un paquete de programas de sistema MRP II desarrollado por Alcatel STK en Oslo. Esta compañía decidió en 1985 reemplazar su propio sistema MRP, desarrollado en los 70, por un auténtico paquete MRP II que utilizaba la tecnología informática más moderna. Reconociendo que este cambio podría afectar a la organización y trabajo de muchas personas, Alcatel STK impartió formación a más de 400 empleados. El sistema, implantado por etapas, lleva ya funcionando tres años, y se le atribuyen las mejoras siguientes:

Tamaño de los lotes de pedido	reducción 40%
Tiempo de entrega total	reducción 50%
Inventario	reducción 60%
Trabajo en curso	reducción 75%
Fechas de entrega	98% en fecha.

Alcatel STK cree que el interés aplicado en la formación y adiestramiento junto con los cambios de organización introducidos para implantar el sistema contribuyeron de modo decisivo a las mejoras conseguidas.

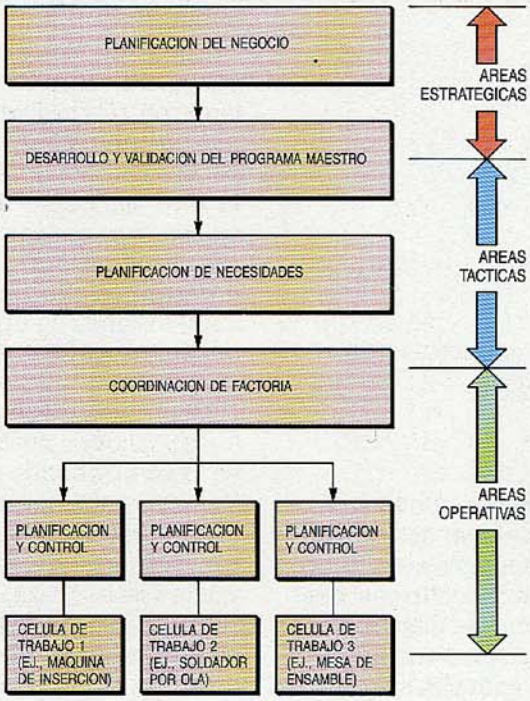


Figura 4
Areas cubiertas por el proyecto Esprit IMPACS.

Otro ejemplo es la incorporación de técnicas de control de producción "japonesas" dentro del contexto del MRP en la planta de Gunzenhausen de Alcatel SEL. Se controlaron partes escogidas de los procesos de fabricación utilizando las tarjetas "kandan", de gran aceptación, con notables ganancias en sencillez y transparencia.

Desarrollo futuro

Los desarrollos en los que participa Alcatel se relacionan tanto con mejorar la función de los sistemas MRP como con la integración de éstos en el negocio global. El IMPACS (sistema integrado de planificación y control de fabricación), proyecto ESPRIT cuatrienal en el que participan AMTC, TITN y LdM, pretende resolver las limitaciones de los MRP II actuales. La figura 4 muestra las áreas cubiertas por el proyecto IMPACS, que en resumen son las siguientes:

- Arquitectura IMPACS se ocupa de proponer una arquitectura general del sistema que asegure la coordinación entre funciones en los distintos niveles de control y decisión.
- Planificación del negocio examina el proceso de esta planificación con el fin de definir su relación con el programa maestro y las aplicaciones de sistema requeridas para soporte de este proceso.
- Desarrollo y verificación del programa maestro se ocupa de elaborar herramientas informáticas que ayuden a desarrollar y mantener dicho programa maestro.
- Coordinación de factoría se ocupa de desarrollar aplicaciones que permitan ejecutar el programa maestro en la factoría.
- Tecnología de la información se ocupa de desarrollar un sistema soporte de decisiones de grupo que facilite tomar decisiones en los niveles estratégico, táctico y operativo del IMPACS.

Otra iniciativa importante en la que participa Alcatel es el desarrollo por el Masssachusets Institute of Technology de un sistema avanzado de programación cronológica que responda en tiempo real a los cuellos de botella de capacidad, variando las fechas programadas del pedido o de la operación. Al decidir qué pedidos se han de cambiar, el sistema tiene en cuenta el efecto causado sobre el MPS. Este esfuerzo se conjuga con la implantación por las casas Alcatel de facilidades no solamente para planificar "de arriba a abajo" sino también para seguir el curso de un producto "de abajo a arriba", con lo que se puede trasladar al MPS o incluso al pedido del cliente la causa del cuello de botella en capacidad o materiales y se facilita la toma de decisiones.

Para Alcatel y la mayoría de las compañías fabricantes, el MRP es el sistema primario de operación y constituye la base del desarrollo de futuros sistemas de fabricación. Las compañías que han preparado planes para el CIM (fabricación integrada por ordenador) consideran el MRP como elemento

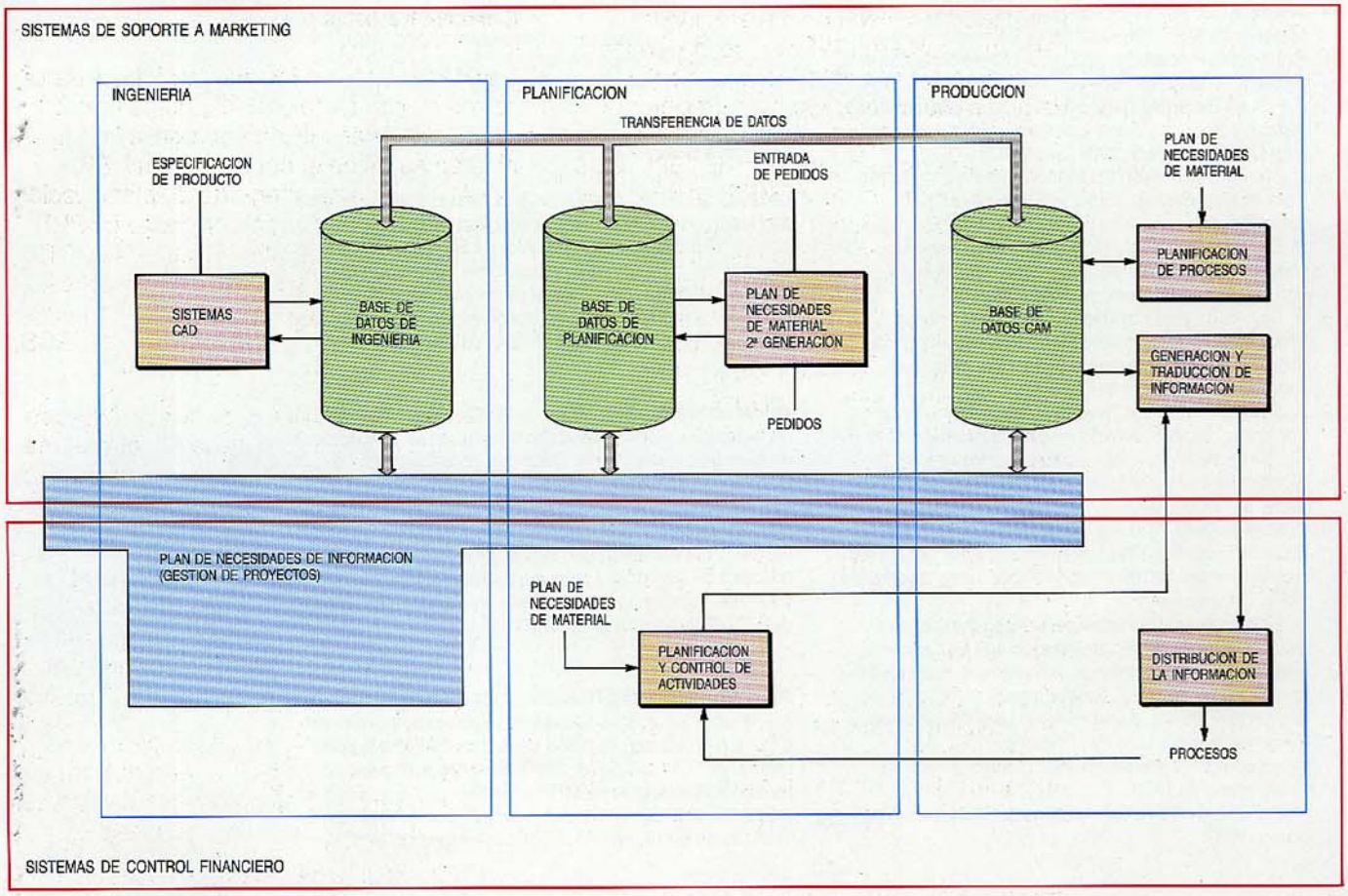


Figura 5
Módulo genérico de Alcatel para fabricación integrada por ordenador.

principal para conseguir este objetivo. La figura 5 representa el modelo CIM genérico de Alcatel. Muchos de los proyectos para realizar este modelo en los que trabajan compañías Alcatel individuales intentan unir el MRP con el CAD/CAM y apuntan al pleno soporte informático de la actividad empresarial. A través de estos interfaces y desarrollos se ensancharán los límites del MRP de modo que en el futuro pueda gestionar todo el proceso de fabricación, desde la recepción de un pedido del cliente hasta la entrega del producto terminado.

Merece la pena señalar una tendencia final. Dentro del sistema hombre-máquina, el control regresa claramente hacia el hombre. El concepto primitivo de introducir en la máquina una multitud de reglas de decisión, algoritmos y estrategias (por muy ingeniosas que hayan parecido a los diseñadores) va dejando paso gradualmente a otra percepción de cuáles son los cometidos del "hombre" y la "máquina". El enfoque actual intenta encarnar en el usuario la autoridad decisoria, evitando confusas optimizaciones encerradas en "cajas negras" que pudieran alienar al usuario del control activo de los procesos reales. Con objeto de facilitar la toma de decisiones, el sistema proporciona al usuario toda la información pertinente, del modo más ergonómico posible. Los sistemas modernos ofrecen pues una calidad de apoyo a las decisiones en vez de tomar decisiones por sí mismos.

Conclusiones

Los sistemas MRP contribuyeron notablemente a la planificación y control de inventarios, equipos y mano de obra durante los años 60 y 70, y ayudaron a administrar la rápida evolución de productos experimentada durante ese periodo. Los futuros sistemas de planificación y control deben sobrepasar los límites tradicionales del MRP, de modo que se tengan en cuenta los recursos internos y externos cuya coordinación es imprescindible para mantener la eficacia de la fabricación en una compañía.

Bibliografía

1 J. Orlicky: Material Requirement Planning: *McGraw Hill*, 1975.
2 O. Wight: Input/Output Control a Real Handle on Lead Time: *Shop Floor Control Reprints: American Production and Inventory Control Society*, 1973, págs. 23–87.
3 G. Plossi y O. Wight: Capacity Planning and Control: *American Production and Inventory Control Society*, 1975, págs. 50–86.

4 J. Orlicky, G. Plossi y O. Wight: Structuring the Bill of Material for MRP: *Material Requirements Planning Reprint, American Production and Inventory Control Society*, 1973, págs. 56–79.
5 J. Proud: Controlling the Master Schedule: *Process Industry Reprints, American Production and Inventory Control Society*, 1984, págs. 108–117.
6 H. Mather: MRP Won't Schedule the Factory of the Future: *CIM Review*, 1986, volumen 3, nº 1, pags. 64–68.
7 R. D. Garwood: Explaining JIT, MRP II, Kanban: *Production and Inventory Management Review*, octubre 1984, volumen 4, nº 10, págs. 66–71.
8 B. Belt: MRP and Kanban: A Possible Synergy: Production and Inventory Management, *American Production and Inventory Control Society*, volumen 28, nº 1, págs. 71–80.
9 J. J. Kanet: MRP 96: Time to Rethink Manufacturing Logistics: *Production and Inventory Management Systems, American Production and Inventory Control Society*, 1988, volumen 29, nº 2, págs. 57–61.
10 Proceedings of Working Conference on Knowledge Based Production Management Systems: *International Federation for Information Processing*, agosto de 1988, Galway.
11 B. Eidenmüller: Durchlaufzeitstrategie in der Produktion, dargestellt an Beispielen aus der Informationstechnik: *Proceedings of Schmalenbachgesellschaft*, mayo de 1987, Sindelfingen.
12 A. Waldraff: Asset Management: Logistik und weiterführende Konzepte in der Praxis der SEL AG: *Proceedings of the Stuttgarter Controller Forum*, septiembre de 1988.
13 A. W. Scheer: Computer Integrated Manufacturing, Berlín, 1987.
14 S. C. Wheelwright y R. H. Hayes: Manufacturing as a Competitive Weapon: *Harvard Manager*, 1989, volumen 4, págs. 87–93.

François Bolay nació en Zurich, Suiza, en 1949. Se graduó en ingeniería electrónica en la Ingenieurschule de aquella ciudad, donde también estudió ingeniería de fabricación en la Eidgenössische Technische Hochschule. El Sr. Bolay entró en Alcatel STR en 1982 como director del proyecto de evaluación e instalación de un sistema MRP II. Actualmente es responsable del grupo de soporte logístico y de IS, así como de la coordinación de todas las actividades CIM de la compañía.

Andreas Waldraff nació en 1944. Obtuvo la licenciatura en ingeniería y administración de empresas y se doctoró en esta última disciplina. Después de trabajar en Daimler-Benz y en A. T. Kearney, en 1950 ingresó en Alcatel SEL, donde hoyu es responsable de las funciones logísticas de los sistemas de redes públicas, incluyendo la planificación comercial, gestión de activos, proceso de pedidos, compras, estrategia logística, sistemas y procedimientos. El Dr. Waldraff es miembro del VDI, Schmalenbach y BPICS.

Alan White nació en 1944. Se graduó HND en ingeniería eléctrica. Tras un aprendizaje en ingeniería, ingresó en STC (Reino Unido) en 1968 y fue transferido a la sede central de ITT Europe en 1980. Durante este periodo trabajó en proyectos de MRP en el Reino Unido. EE. UU. y Sudáfrica. El Sr. White dirige actualmente sistemas de fabricación en Alcatel AMTC. Es miembro de APICS.

Importancia y efectos de la filosofía "justo a tiempo"

La fabricación "justo-a-tiempo" ha sido adoptada por varias fábricas de Alcatel. Las ventajas de este enfoque en cuanto a fabricación y control de producción incluyen los menores tiempos de entrega, una máxima flexibilidad de producción y la reducción de los inventarios.

R. Aerts
Alcatel Bell Telephone, Geel, Bélgica
P. Bech
Alcatel STK, Oslo, Noruega
J.-P. Le Friec
Alcatel CIT, Eu, Francia

Introducción

Como indica su nombre, el enfoque JIT (*just-in-time*, justo a tiempo) de la fabricación tiene por objetivo hacer cada cosa justamente cuando se necesita, ni antes, ni después. Es la clave para conseguir la máxima flexibilidad de la producción, lo que significa acortar los tiempos de entrega en cada etapa de la cadena de fabricación.

La máxima flexibilidad se logra cuando las inversiones en inventario se realizan lo más tarde posible. Lo siguiente en la escala de flexibilidad es mantener el inventario como componentes y materiales individuales a partir de los cuales se podrá fabricar una diversidad de productos. Tan pronto como los materiales se asignan y empieza la fabricación, la flexibilidad se pierde.

Cuando el JIT se aplica plenamente, afecta a toda la cadena de fabricación de un producto, desde la compra de los componentes hasta la entrega al cliente. No obstante, este artículo se centra en los aspectos de fabricación, empezando en el almacén de materias primas y siguiendo hasta el fin de la producción.

A primera vista la filosofía JIT puede parecer simple y obvia, pero en la práctica su ejecución efectiva tiene implicaciones insospechadas, cual es el compromiso de mejorar la calidad y combatir el despilfarro, tanto en el tiempo de entrega como en los materiales y el espacio en planta. Son varios los enfoques JIT del control de la planta, que van desde los potentes sistemas informatizados hasta los ajustes de sentido común en la planta.

La filosofía JIT se utiliza extensamente en Alcatel para una serie de aplicaciones. Por ejemplo, en Alcatel STK para la producción en serie y en Alcatel CIT para los productos de tecnología avanzada. Por otra parte, Alcatel Bell Telephone ha combinado la teoría JIT con la teoría de las restricciones.

JIT para producción en serie

Alcatel STK ha adoptado un enfoque relativamente simple para implantar el JIT. En 1985 la Compañía iniciaba la fabricación de PBA (placas de circuito impreso ensambladas) en su factoría de Kongsvinger, a 100 km de la fábrica principal de Oslo. Se decidió aplicar un principio JIT basado en fabricar productos de transmisión completos en células de trabajo separadas.

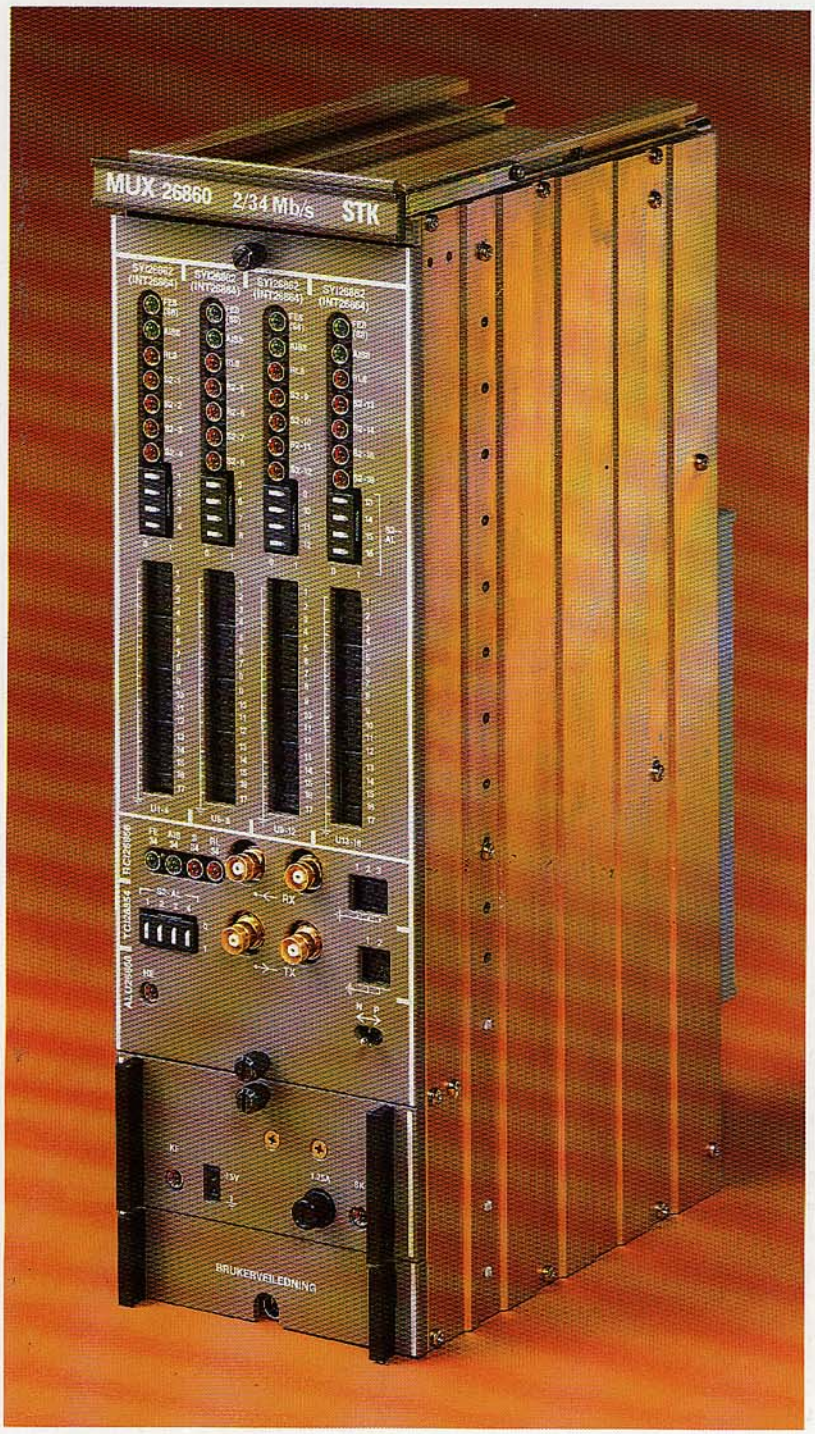
La primera etapa fue un programa de adiestramiento y concienciación para todos los implicados, desde expertos en planificación hasta operarios de la factoría.

Dado que en Noruega se necesitan relativamente pocos productos de transmisión, hubo que seleccionar cierto número de ellos para ser fabricados conforme a la filosofía JIT. En consecuencia, había que tener equipos costosos, tales como máquinas de ensamble automático, máquinas de soldadura y equipo estándar de prueba, a la disposición de varias células de trabajo. A la hora de definir flujos de materiales, estructura de la línea de ensamble y capacidad de producción hubo de tenerse en cuenta esta combinación de equipos comunes y especializados. El sistema MRP (*material requirement planning*, planificación de necesidades de material), común para las factorías de Oslo y Kongsvinger, cubre asimismo el material para estos productos; considera la planta de Kongsvinger como un departamento o centro de trabajo, siendo todo lo que cae dentro de dicha planta tratado según el principio JIT de que un producto

no avanza en la línea de ensamble hasta que no lo solicita el operario siguiente.

Para acometer el problema de cargar de modo uniforme el equipo común y de verificar la disponibilidad de material por el sistema MRP, hubo que modificar la estructura de la *lista de materiales*. Se adoptó una lista de materiales de un solo nivel para facilitar los cálculos y la total revisión de los materiales del producto completo. La regla, sin excepciones, fue que la producción no debería iniciarse mientras no se dispusiera de todos los materiales necesarios para completar el producto.

Alcatel STK sigue el enfoque JIT para construir su gama de multiplexores de 2/34 Mbit/s. Como resultado, el tiempo de entrega total de la fábrica se ha reducido a ocho días solamente.



Se comprendió también que la operación con tiempos de entrega cortos exigía regularizar los volúmenes de producción durante ciertos periodos (o sea, producir a un ritmo estable en vez de fabricar determinado número de unidades para una fecha fija), y así se acordó con el departamento de planificación, alterando el programa maestro de producción en consecuencia.

Con objeto de reducir los tiempos de preparación, se estableció un programa para su control. Al mismo tiempo, la estabilidad de ritmo exigida se modificó desde entregas diarias a entregas en días alternos, haciéndose más fácil equilibrar la carga de los distintos productos sobre los equipos comunes.

Según el principio de acopio elegido, la línea de ensamble sólo dejaba en cada posición de operario espacio suficiente para una cierta cantidad de material, previamente calculada, con la que se fabricará el producto. Como los operarios de ensamble y de pruebas trabajan sobre el mismo producto, ellos pueden decidir dónde se necesitará un esfuerzo adicional para mantener el ritmo de entrega. Es esencial tener operarios multiespecializados para aprovechar plenamente este planteamiento. Incluso el empaquetamiento final se incluye en la línea de ensamble, con lo que los operarios podrán ver el producto final al cual han contribuido. Se estructuró con cuidado la célula de trabajo para tener contacto visual entre los operarios siempre que fuere posible.

Ventajas del trabajo en equipo

Un grupo de operarios que trabajan juntos y son todos responsables de cumplir un programa de producción determinado, se sienten sin duda altamente motivados. Sus estrechas relaciones en el trabajo implican que pueden intercambiarse indicaciones y observaciones constructivas con mayor rapidez que lo haría cualquier sistema informático avanzado, con lo que salen ganando la productividad y la calidad del producto.

Mejorando gradualmente un sinfín de pequeños detalles, el tiempo transcurrido entre el acopio de componentes del almacén principal y la entrega del producto empaquetado se redujo desde los 50 a 60 días habituales hasta solamente 5 a 8 días, incluyendo un tiempo de maduración de tres días (Fig. 1). Quedó entonces de manifiesto que los acuerdos establecidos con el cliente no eran óptimos; en cierto producto, el acuerdo era despachar 1000 unidades al final de cada mes aunque el ritmo de producción era de 250 por semana. La situación mejoró merced a nuevos acuerdos con el cliente, basados en entregas menores y más frecuentes.

La ventaja de mantener la flexibilidad el mayor tiempo posible se demostró un año después cuando cayó notablemente el mercado de uno de los productos. La baja cantidad de trabajo en curso permitió a Alcatel STK iniciar inmediatamente la fabricación de otros productos, evitando así la obsolescencia de mercancías terminadas.

Como consecuencia de la implantación del JIT, la planta de Alcatel STK en Kongsvinger se ha transformado en una unidad de producción de equipos de transmisión eficiente y flexible. Este sencillo enfoque JIT ha sido también adoptado ahora para la producción de unidades del Sistema 12 de conmutación digital, que utiliza tecnologías más avanzadas.

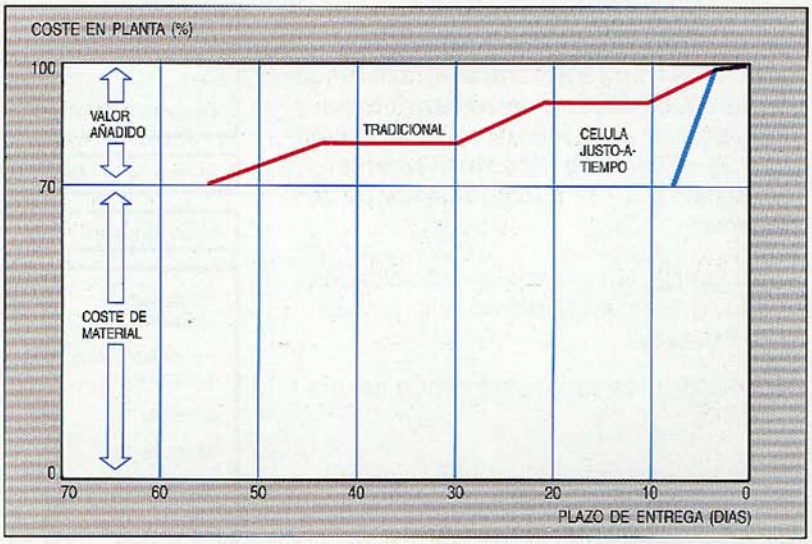


Figura 1
Reduccción de tiempos de entrega de fábrica en Alcatel STK como resultado de introducir el método JIT de producción por células para los multiplexores de 2/34 Mbit/s. El trabajo en curso se ha reducido en un factor de siete.

JIT para productos de tecnología avanzada

Las factorías de Alcatel CIT en Eu y Cherburgo, en Francia, fabrican grandes cantidades de equipos de conmutación digital del sistema Alcatel E10. Para asegurar que los medios de producción puedan satisfacer una extensa gama de requisitos específicos del usuario, ofreciendo a la vez la máxima compatibilidad entre subunidades y piezas del sistema, se consideró necesario el uso de una herramienta eficaz, basada en ordenador, y con tal finalidad Alcatel CIT ha desarrollado el sistema SIA (asistencia a la integración de subunidades). El SIA se utiliza normalmente como complemento del sistema MRP para el control de la planta mediante técnicas JIT, obteniendo una óptima flexibilidad de la producción.

Los objetivos de la herramienta SIA son:

- Traer a la planta todas las subunidades necesarias para la producción. Esto implica determinar lo que se necesita en cada etapa de fabricación y asegurar que se dispone de los componentes, materiales y productos correspondientes.
- Traer sólo la cantidad de subunidades correcta.
- Asegurarse de que las fechas de proceso de subunidades en las etapas intermedias vayan de acuerdo con las necesidades del ensamble final, controlando cada etapa del ciclo de fabricación.
- Contrastar continuamente el progreso de cada etapa con las previsiones semanales.
- Tener en cuenta las necesidades de ambas factorías (Cherburgo y Eu).
- Responsabilizar de sus progresos al personal de planta.

Etapas de fabricación

Las operaciones del proceso de fabricación están acotadas por los puntos de referencia ("milestones") 01 a 13. En la figura 2 (zona amarilla) se indican los más importantes para las PBA.

Cálculos con el SIA

Al final de cada semana, el sistema MRP calcula el número de unidades y correspondientes subunidades que han de fabricarse durante 14 periodos de una semana, más un periodo anterior (zona en azul, figura 2). La cantidad neta a producir en un "milestone" se halla restando de la cantidad neta que corresponde al "milestone" siguiente el trabajo en curso durante el periodo comprendido entre ambos. Esto se hace para cada factoría por separado.

A esta cantidad neta debe corresponder la salida total de productos en esa semana. La salida se mide en tiempo real en los

Figura 2
Milestones para la producción de placas de circuito impreso.

Milestones Clave	Operaciones	Trabajo en curso	Necesidades netas = necesidades salida
13	Integración (ensamble final)	20	↑ 50
12	Transferencia de placas	10	↑ 30
11	Aseguramiento de la calidad	0	↑ 20
10	Prueba de placas	8	↑ 20
09	Operaciones complementarias	5	↑ 12
07	Máquina de soldadura por ola Inserción manual	6	↑ 7
05	Inserción automática	10	↑ 1
03	Inicio de la fabricación	8	↑ 0
02	Preformado Acopio de piezas	0	↑ 0
01	Programación		↑ 0

milestones clave leyendo el progreso en tarjetas magnéticas. Por ejemplo, empezando en la figura 2 por arriba, el neto requerido es 50; se dispone de 20 para integración y por ello en el milestone 12 se necesitarán 50 – 20 = 30, y así sucesivamente.

El sistema SIA se puede clasificar de dos maneras:

- por familia, agrupando las subunidades que pertenecen al mismo taller o clase de producto
- por código de subunidad dentro de una familia.

Pueden obtenerse unas y otras listas de modo directo en la planta, utilizando pantallas conectadas al sistema MRP. El SIA por familia (Fig. 3) presenta en pantalla la suma de necesidades netas de ambas factorías, calculadas en cada milestone para todas las subunidades de la familia. Se utiliza como herramienta que permite medir el progreso de la producción cada lunes, por la mañana, y comprobar que tanto el programa previsto como el inicio de la producción y la integración se realicen todos en los tiempos adecuados.

El SIA por código de subunidad se visualiza presentando cinco códigos por página (zona E, figura 4) pertenecientes a una determinada familia (EO) para un cierto milestone (09) – una y otro invocados por el operario (zona B) – para la semana en curso (zona C). La zona F indica las necesidades netas por factoría, calculadas durante el fin de semana, en el milestone mostrado (09) y en las semanas presentadas en las que debe ocurrir la integración.

La zona G representa la salida real acumulada en el milestone (09), que se pone a cero cada fin de semana y se va actualizando en tiempo real durante la misma. Está relacionada con las necesidades netas, empezando con la semana más antigua; así, cuando dichas necesidades netas para una semana se satisfacen en ambas fábricas, aparece un signo (=): El progreso de la producción se presenta "on-line" y se pueden seleccionar con facilidad las subunidades que han de traerse a la línea de ensamble.

La zona H se actualiza en tiempo real para cada factoría. Indica cuál es el número de milestone por el que acaba de pasar el trabajo en curso, con el fin de poder sacar las subunidades del lugar en que estén en la línea de producción.

En la zona D se muestra la previsión calculada a partir del ciclo de fabricación de la familia. Al terminar la semana, todas las salidas deben ser "igual" (=) hasta la semana de integración, señalada con un asterisco (8906).

Semana WN = 8905

Familia: EO
Designación de la familia: PBA lógicas para bastidores de abonados CSN

Número de la semana	<WN–2	WN–2	WN–1	8905	8906	8907
Necesidades netas para:						
Integración (milestone 13)	73	211	415	834	1240	945
Fin de fabricación (milestone 12)	10	72	211	733	1183	945
Milestone 11	10	72	211	733	1183	945
Milestone 10	8	72	200	693	1183	945
Milestone 09	0	30	73	666	1111	945
Milestone 07	0	0	15	581	1011	933
Milestone 05	0	0	0	0	987	889
Milestone 03	0	0	0	0	0	889
Milestone 02	0	0	0	0	0	0
Milestone 01	0	0	0	0	0	0

Figura 3
Ejemplo de SIA por familia.

El personal de la planta podrá medir su rendimiento y ajustar de modo preciso la producción a las necesidades.

Se puede cambiar de familia de producto (el encargado puede acceder a cualquier familia) y modificar el número de milestone para traer a la cadena las subunidades que se hayan retrasado o pedir que sean transferidas desde la otra factoría.

El JIT y la teoría de las restricciones

Una de las más interesantes escuelas de gestión de la fabricación aparecidas en los últimos años es la "teoría de las restricciones" (TOC, Theory of Constraints), adoptada por Alcatel CIT, en combinación con los principios del JIT.

Teoría de las restricciones

Toda realización ha de partir de que la dirección admita que cualquier empresa comercial aspira a rentabilizar al máximo sus inversiones. Las ideas TOC están dirigidas a promover cambios para incrementar la tasa de generación de dinero a través de las ventas, reduciendo a la vez inventarios y gastos de explotación. La teoría es tan simple que sus ideas pueden resumirse en una sola frase:

> *El comportamiento de cualquier sistema real está limitado por sus restricciones.*

En este contexto, las restricciones pueden estar relacionadas con:

- la limitada demanda del mercado
- los limitados recursos (maquinaria, etc.)
- la calidad
- los plazos de entrega de componentes y materiales por suministradores externos
- las reglas de fabricación y los procedimientos de operación
- la estructura de la organización
- el modo de pensar del personal y los directivos, ya que ello puede constreñir el desarrollo futuro.

La dirección debe identificar, controlar y eliminar las diversas restricciones del sistema.

La TOC se basa en que el mejor modo de elevar la competitividad es tratar de eliminar las restricciones. En cualquier organización cuya dirección gasta sus limitados recursos en deshacer cuellos de botella cruciales, es posible conseguir resultados mucho mejores con el mismo esfuerzo. El TOC, gestión de las restricciones, no es solamente una nueva forma de pensar sino también una estrategia empresarial. El estudio de las restricciones de un sistema debe asumirlo la Compañía entera y no partes aisladas de ella, ya que las acciones, por ejemplo, de control de producción, gestion de materiales (transporte, compra, planificación), gestión comercial y financiera inciden unas sobre otras. Como sencilla ilustración de este principio, si hay alguna restricción de fabricación para un producto concreto su promoción no debe recomendarse al departamento de ventas. Por lo tanto, todos los departamentos deberían comprender la TOC y ser conscientes de las restricciones en otros departamentos.

Aplicación: las cinco etapas de la TOC

Al principio de 1988, Alcatel Bell Telephone aplicó las ideas TOC en la planta de ensamble de Geel con objeto de incrementar en un 50% la producción. La primera etapa consistió en ver dónde estaba la restricción del sistema. Un análisis realizado en enero demostró que la máquina de inserción de SMD (dispositivos de montaje superficial) ocasionaría una restricción – cuello de botella – a lo largo del año en la línea de ensamble de centrales telefónicas digitales Sistema 12 (Fig. 5). Una vez determinado el eslabón más débil de la cadena, la dirección concentró en él su atención.

La segunda etapa de la TOC exige que se elaboren planes para reducir al mínimo los efectos restrictivos. Cada semana el jefe de producción, el jefe del departamento de planificación y el jefe de planta prepararon un plan detallado para la máquina de posicionado de SMD con el fin de garantizar que su limitada capacidad se asignara en la medida posible a pedidos que diesen los resultados más abundantes. Esta tarea es esencialmente directiva, y no es propia de

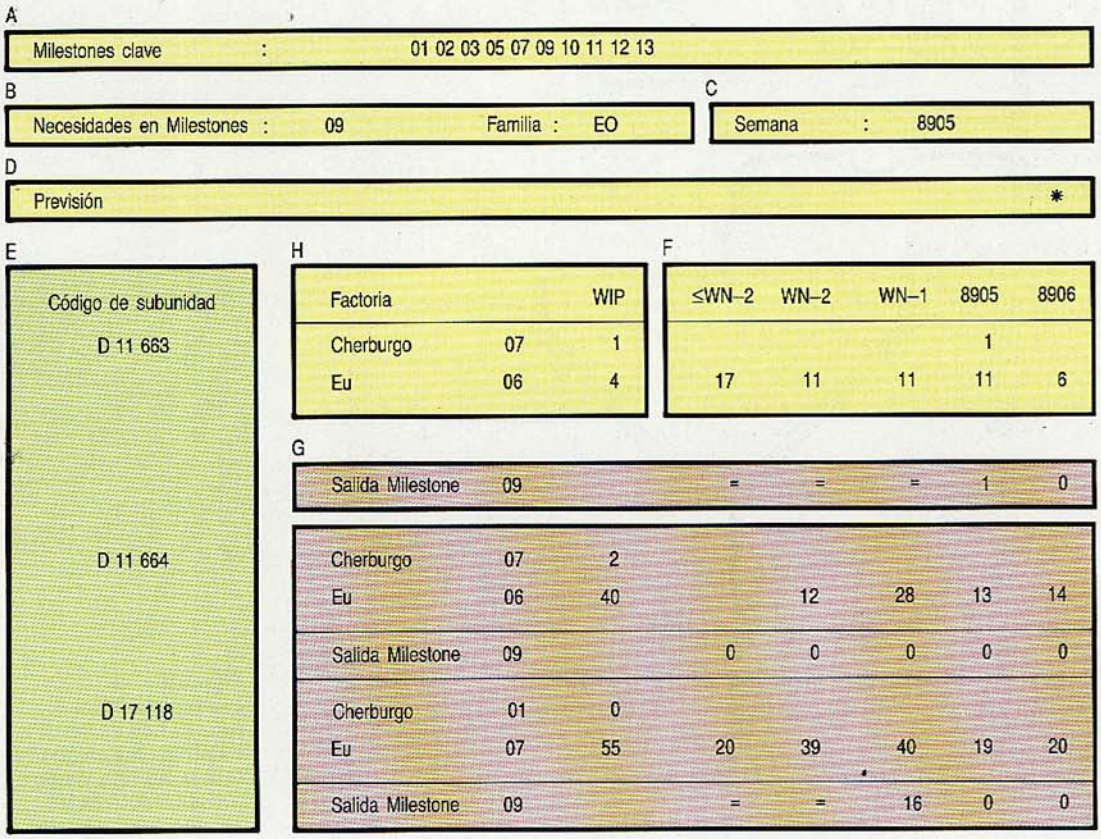


Figura 4
Ejemplo de SIA por número de código
WIP – trabajo en curso
WN – número de semana.

encargados o administrativos de producción.

Las demás máquinas (secuenciadoras, insertadoras, estaciones de ensamble, etc.) eran "no restrictivas", puesto que no limitaban la cantidad producida. Sólo había que cerciorarse de que la previsión de estos recursos fuese acorde con la adoptada para la máquina de posicionado de SMD, lo que constituye la tercera etapa TOC.

Esto se consiguió merced al concepto "restricción, tampón, regulador" (*Drum, Buffer, Rope*) de la TOC. La producción se controla por un sistema JIT que va tirando del producto a partir de la "restricción". Si la máquina que crea la restricción está inactiva originará pérdidas a la empresa, y por ello es importante protegerla contra variaciones en la producción (por ejemplo, paradas de otra máquina) estableciendo un "tampón" de materiales frente a la máquina en cuestión. Al mismo tiempo debe mantenerse bajo el inventario de trabajo en curso, y para ello el plan de producción general ha de ajustarse a lo previsto para la restricción ("regulador").

El grupo de Ingeniería Industrial de Alcatel Bell se esforzaba continuamente por

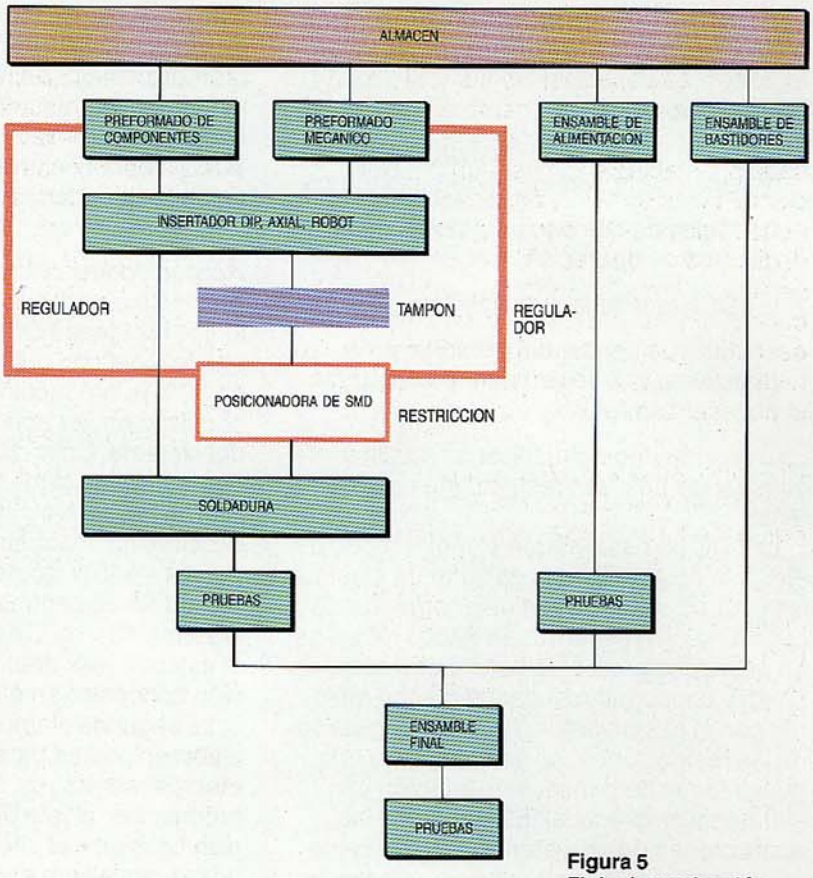


Figura 5
Flujo de producción para una central digital Sistema 12.

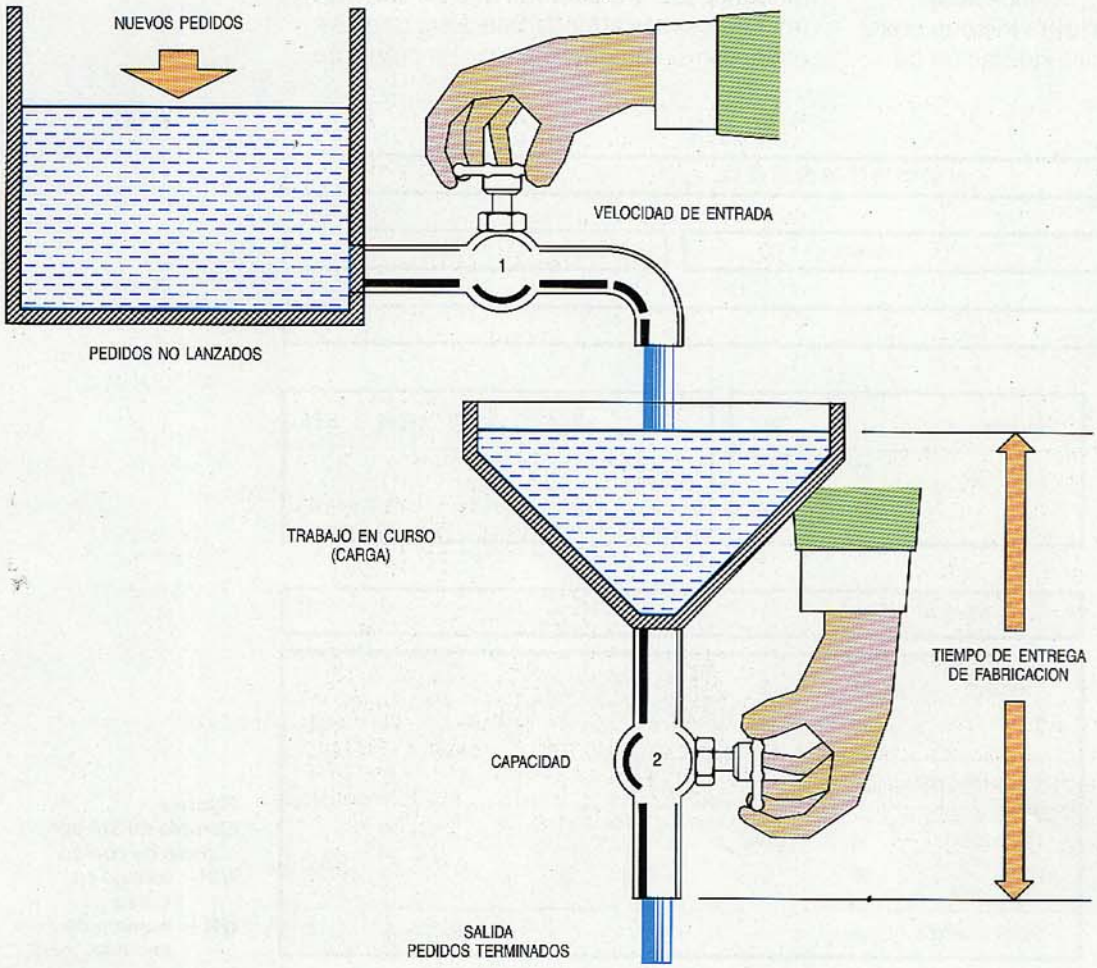


Figura 6
Las restricciones futuras han de ser identificadas en una fase temprana, antes de que afecten a la producción.

aliviar la restricción (etapa 4 de TOC), dedicándose al proyecto los ingenieros más expertos. La capacidad se aumentó reduciendo el tiempo de preparación de la máquina de SMD, subcontratando parte del trabajo, estableciendo tres turnos, reduciendo tasas de fallo y finalmente adquiriendo una nueva máquina de posicionado de SMD. A finales de 1988 esta restricción se había eliminado, pero siempre hay algún condicionante en el sistema y hay que descubrir cuál es ahora (etapa 5) para mejorar todavía más la eficacia, la rentabilidad y el beneficio sobre inversiones.

Planificación a largo plazo con TOC
Como más vale prevenir que curar, Alcatel Bell Telephone trabaja para identificar, lo antes posible, las restricciones que tendrá el sistema mañana, la semana próxima, el mes que viene, dentro de un año, etc. (Fig. 6). Durante el ciclo de vida de un pedido (desde la recepción del pedido y las especificaciones pertinentes hasta la entrega al usuario), la situación se analiza cuatro veces para descubrir posibles restricciones o cuellos de botella:

- al aceptar el pedido
- cuando inician su actividad las fábricas de aprovisionamiento y el departamento de compras
- cuando empieza a trabajar la planta de ensamble (Geel)
- al iniciar sus trabajos el departamento de instalación.

Cuanto antes se detecte una restricción, mayor será la posibilidad de eliminarla antes de que afecte a las previsiones de entrega.

Sentido de la TOC
La TOC tiene en común con el JIT que es mucho más que una herramienta para obtener mejoras: es una nueva forma de pensar. Los planteamientos TOC rebasan a los JIT y su realización es adicional a ellos. En su planta de ensamble de Geel, Alcatel Bell aplica el enfoque TOC en cuatro áreas: tamaño del lote, inversiones, calidad y rendimiento. La manera de tratar estos aspectos depende mucho de que impliquen restricción o no. Por ejemplo, hacer lotes pequeños, ¿da siempre lugar a un inventario más reducido? La respuesta es negativa; en efecto, si una máquina no tiene suficiente capacidad (restricción) y gran parte de ella se dedica a prepararse para producir pequeños lotes, la capacidad de producción decrecerá (habrá menos salida) y aumentará el inventario a lo largo de la línea de producción hasta el punto de restricción (máquina de posicionar SMD, por ejemplo). Por otra parte, el tamaño del lote cuando no hay restricción debe ser lo más pequeño posible para conseguir un mínimo inventario y elevar la cantidad producida.

A la pregunta sobre si la mayor utilización de la capacidad reduce siempre los costes, ha de responderse también negativamente, pues si una máquina está sobredimensionada – es decir, nunca crea restricción – y se la utiliza al máximo de su capacidad, el inventario aumentará pero la productividad se mantendrá estática.

Aunque la filosofía que subyace a la TOC pueda parecer contradictoria y difiera bastante de nuestro modo de pensar actual, un examen más detenido demuestra su carácter lógico.

Conclusiones

La experiencia en metodología JIT ha fortalecido la creencia de Alcatel en la teoría del sentido común. Es evidente que la aplicación de las ideas JIT en estrecho acuerdo con la teoría de las restricciones, a través de una organización entera (no solamente una fábrica) ayudará a optimizar no sólo los procesos fabriles sino numerosos aspectos de las operaciones habituales.

Roger Aerts nació en Booischot, Bélgica, en 1942. En 1966 se graduó en ingeniería electrotécnica por los Universidad de Lovaina, y al año siguiente entró en BTM (hoy Alcatel Bell Telephone), donde se dedicó a capacitación de directivos. Después de dirigir el departamento de planificación de producción para conmutación, transmisión y PABX, fue nombrado responsable de materiales para la planta de Geel. En 1977 obtuvo un grado MBA en la la Universidad de Limburg. Hoy en día, el Sr. Aerts es director de planta para telecomunicaciones.

Pål Bech nació en 1947 en Oslo, Noruega. En 1970 se graduó ingeniero electrónico por la Universidad de Newcastle-upon-Tyne, en Inglaterra. Dos años después entró en Alcatel STK, y a mitad de los setenta fue responsable de la ingeniería industrial en ITT Europe. El Sr. Bech dirige actualmente la tecnología de fabricación para la división de sistemas de redes públicas de Alcatel STK.

Jean-Paul Le Friec nació en 1937 en Guingamp, Francia. Se graduó en la Ecole Supérieure d'Electricité y en 1975 entró en Alcatel, tras haber trabajado varios años en Xerox Corp. en CAD para circuitos integrados a medida. Fue responsable de instalar el sistema MRP de Alcatel Positel en la fábrica de Cherburgo, en 1987. El Sr. Le Friec se encarga actualmente de coordinar la fabricación asistida por ordenador y de las actividades organizativas en las plantas de Eu y Cherburgo de Alcatel CIT.

Introducción a la tecnología de dispositivos de montaje superficial

La introducción de componentes de montaje superficial es uno de los cambios importantes que más afectan a la fabricación de sistemas de comunicaciones. Presentan muchas ventajas sobre los componentes convencionales con terminales, pero se han tenido que idear nuevas técnicas de fabricación para aprovechar al máximo el potencial de estos dispositivos.

P. Meesemaecker
Alcatel CIT, Eu, Francia
W. Rozumek
Alcatel SEL, Mannheim, República Federal de Alemania
R. Tarrieu
Alcatel Espace, Toulouse, Francia

Introducción

Hasta fechas recientes, casi todos los componentes usados en la industria electrónica estaban dotados de terminales (Fig. 1) que permitían su montaje en zócalos o, más a menudo, su inserción a través de taladros en una placa de circuito impreso para luego soldarlos. Sin embargo, pese a su extensa utilización en la industria electrónica, los componentes con terminales no son adecuados para ciertas aplicaciones, sobre todo en microondas donde la longitud y forma de las conexiones pueden afectar notablemente a los parámetros del circuito y producir interferencias. Ya hace tiempo que equipos como los amplificadores de alta frecuencia, osciladores y filtros en transmisores de estaciones terrenas y satélites, utilizan componentes sin terminales que se posicionan y sueldan directamente en la placa impresa.

Otra razón para emplear componentes sin terminales, generalmente denominados SMD o dispositivos de montaje superficial, es que son más pequeños que los componentes convencionales y pueden montarse en ambas caras de la placa, reduciendo así el peso y el tamaño del producto final. Esto unido a los altos niveles de integración de los SMD, posibilita construir equipos compactos que tengan sin embargo gran variedad de funciones, lo que tiene especial importancia en las industrias aeronáutica, espacial y de consumo (cámaras, ordenadores y equipos hi-fi), donde la miniaturización es un objetivo principal. La figura 2 muestra varios tipos de SMD.

Numerosos productos de Alcatel utilizan ya diversos SMD, incluyendo portadores cerámicos de circuito sin terminales. Estudios realizados en Estados Unidos predicen que llevarán SMD casi la mitad de los dispositivos electrónicos producidos en 1990. La figura 3 muestra que por razones económicas la industria electrónica pasará a tecnología SMD en los próximos años, si bien seguirán también en uso por largo tiempo los componentes con terminales convencionales.

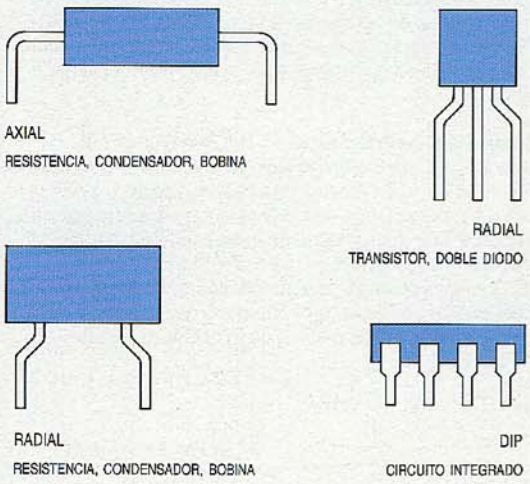


Figura 1
Componentes convencionales con terminales que se montan en placas de circuito impreso utilizando taladros metalizados.

Estrategia y productos de Alcatel

Conociendo las anteriores predicciones, Alcatel empezó a trabajar muy pronto para dominar el proceso de SMD. Se efectuaron varias prácticas de taller en SMD y se establecieron programas de trabajo comunes

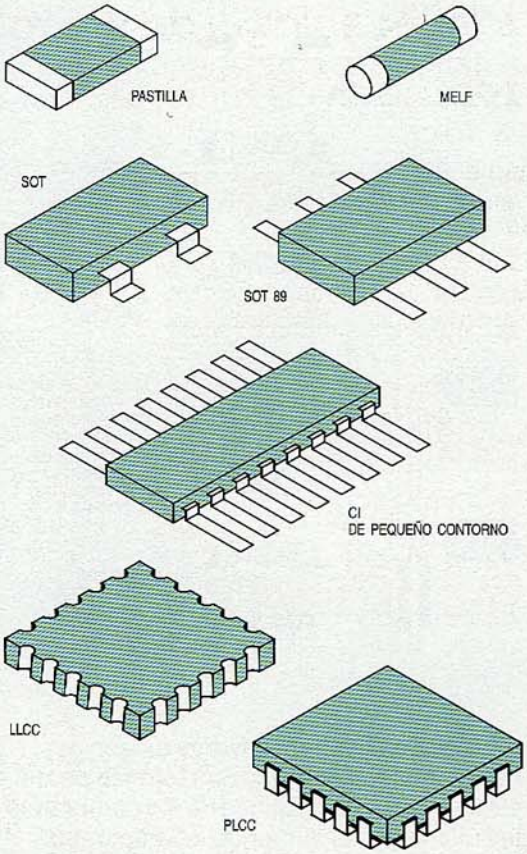


Figura 2
Diversos tipos de componentes "sin terminales" que se montan en las placas impresas con tecnología de montaje superficial.

que involucraban a las principales casas europeas. También se emprendieron programas conjuntos entre casas Alcatel y sus clientes, como por ejemplo los contratos de investigación suscritos por el CNET (Centre National d'Etudes des Télécommunications) y Alcatel CIT para el diseño de placas que incluyen SMD y portadores plásticos de circuito con terminales.

En 1987 Alcatel CIT comenzó en su planta de Cherburgo la producción de la primera placa hija de abonado que utilizaba SMD. Esta placa contiene gran variedad de componentes: circuitos integrados de pequeño contorno, diodos y transistores, así como resistencias y condensadores con encapsulado en pastillas o "minimelf" (soldadura miniatura a la cara del electrodo metálico). Hoy, la planta de Eu produce más de un millón de esas placas hijas por año, lo que supone unos 60 millones de SMD.

Tras obtener la calificación para el montaje superficial de circuitos sobre placas de poliimida vitrificada mediante soldadura por reflujo de ola en fase vapor, en 1989 Alcatel Espace fue calificada para el montaje de portadores cerámicos sin terminales en ambas caras de la placa.

Simplificación de la línea de producción

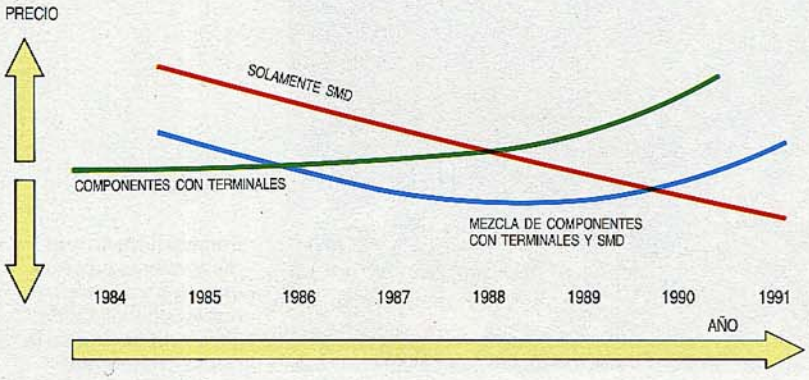
Los SMD no requieren preparación antes de montarse, a diferencia de los componentes con terminales que necesitan diez o más máquinas de preformado, siendo frecuente la pérdida de componentes por un mal ajuste de dichas máquinas. En los SMD no se requiere tal etapa de fabricación. Existe en el mercado una gran variedad de máquinas para ensamble, tanto secuencial como simultáneo, y la elección entre ellas depende de la composición de la gama de productos y del número de componentes y tipos diferentes. En general, el montaje de SMD necesita menos máquinas que el de los componentes convencionales, donde se precisa una máquina distinta para cada tipo de componentes, como son los insertadores de DIP, insertadores de terminales radiales, secuenciadores de componentes* e insertadores de terminales axiales, lo cual requiere más inversiones y repuestos y conlleva costes de mantenimiento adicionales.

En contraste, pueden ensamblarse SMD de diferentes configuraciones con la misma máquina reduciendo tiempos de preparación, inversiones, trabajo de mantenimiento, e inventario de trabajo en curso. Todas las máquinas de producción están controladas por ordenador y el proceso en sí es reproductible en alto grado, lo que garantiza una alta calidad y fiabilidad del producto.

Nuevas reglas de diseño

En lugar de orificios a taladrar, el diseñador debe ahora definir en las placas unas zonas a las que han de adherirse los SMD. Las pruebas de fabricación han demostrado que debe cuidarse mucho la determinación del tamaño correcto de tales zonas para una forma de componente dada. La referida zona de adhesión debe ser algo más ancha que el componente para permitir el autocentrado (resultado de la tensión superficial) durante la soldadura; en cambio, si fuese más estrecha, el componente podría

Figura 3
Ahorro de costes previsto como resultado del uso de tecnologías SMD.



* Máquina que coloca secuencialmente los componentes axiales en una cinta, dispuestos para su paso al insertador axial.

moverse lateralmente y producir cortocircuitos.

Hay varias reglas de diseño que deben aplicarse estrictamente durante el trazado de las placas a fin de utilizar plenamente las capacidades de las máquinas de ensamble y prueba. Las reglas más importantes son:

- seleccionar el tamaño correcto de la zona de adhesión
- espaciar los componentes para evitar "áreas de sombra" que no sean accesibles en la soldadura por ola
- asegurar que la polaridad está en la dirección correcta
- distribuir uniformemente el cobre en toda la superficie de la placa
- disponer "áreas de prueba" que permitan un acceso fácil durante las pruebas
- prever suficiente espacio en torno a los componentes para facilitar reparaciones
- manejar placas pequeñas como si fueran una sola placa grande, y separarlas después de las pruebas.

La mayor integración lleva consigo una mayor densidad de componentes, menor tamaño de los encapsulados, y el montaje de componentes en ambas caras de la placa. Todo ello requiere mejoras en las tecnologías de circuitos impresos, incluyendo pistas de conexión más finas y taladros metalizados enterrados.

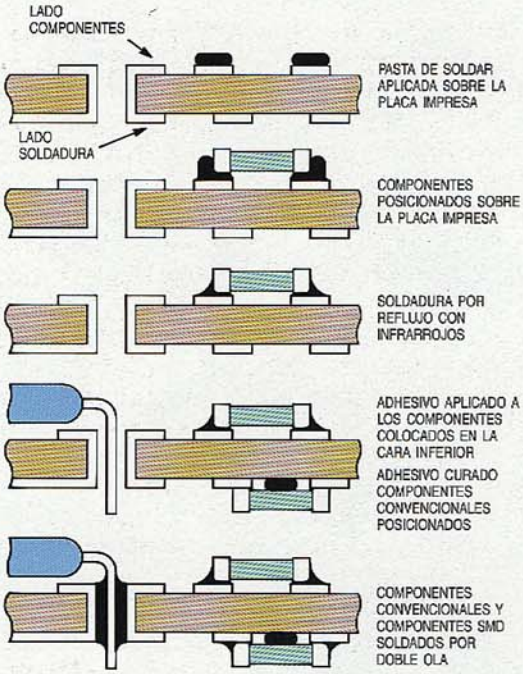
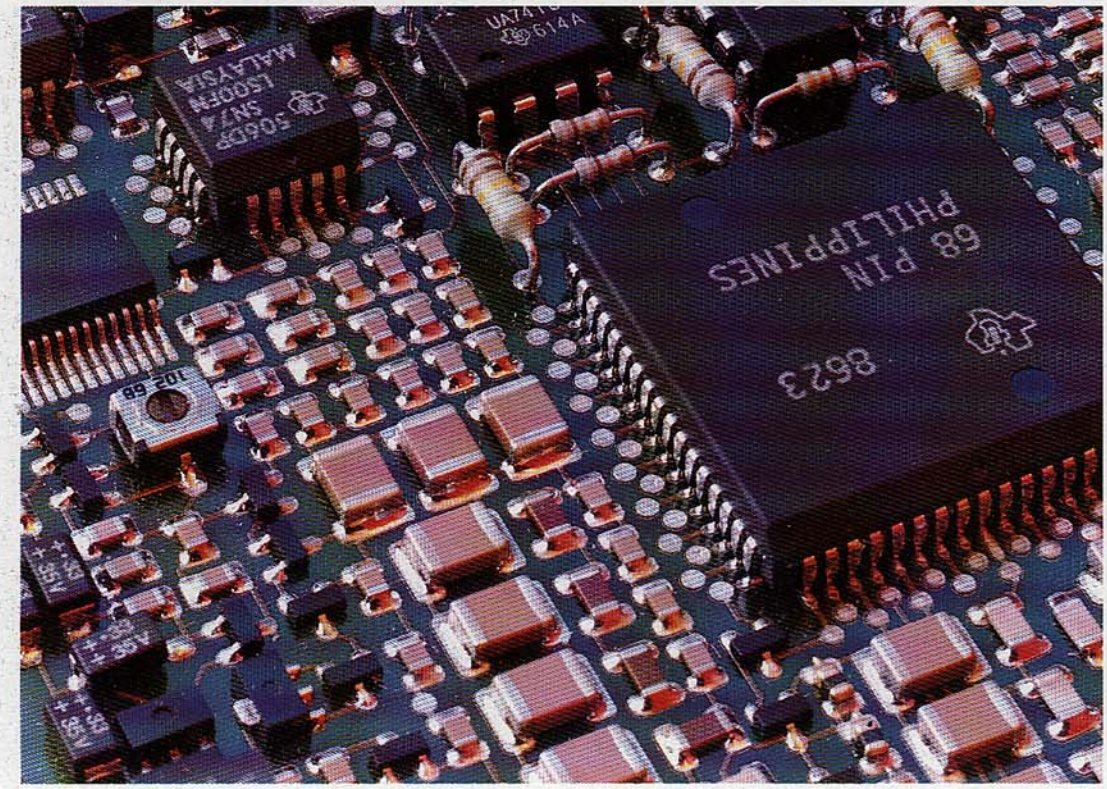


Figura 4
Secuencia de operaciones para el ensamble de una placa impresa que utiliza componentes convencionales y componentes SMD.

Estas densidades mayores exigen asimismo mejorar la disipación térmica de las placas, ya que la fiabilidad de los componentes disminuye al aumentar la temperatura de la unión del dispositivo. Además, en placas de circuito impreso equipadas con componentes tales como los portadores cerámicos de circuito sin terminales, que carecen de conexiones flexibles, las reglas de diseño deben comprobar que tanto la placa como los sustratos y los componentes



Placa equipada con dispositivos convencionales y de montaje superficial, utilizada para calificación de la nueva tecnología.

tengan coeficientes de dilatación similares, de forma que no sufran fatiga al cambiar la temperatura. Antes de posicionar finalmente los componentes, se necesita un estudio que relacione la disipación térmica de la placa con el trazado del circuito mediante CAD (diseño asistido por ordenador). Para asegurar un proceso totalmente reproductible, estas reglas deben formar parte de los programas del sistema CAD.

Adaptación de las líneas de ensamble

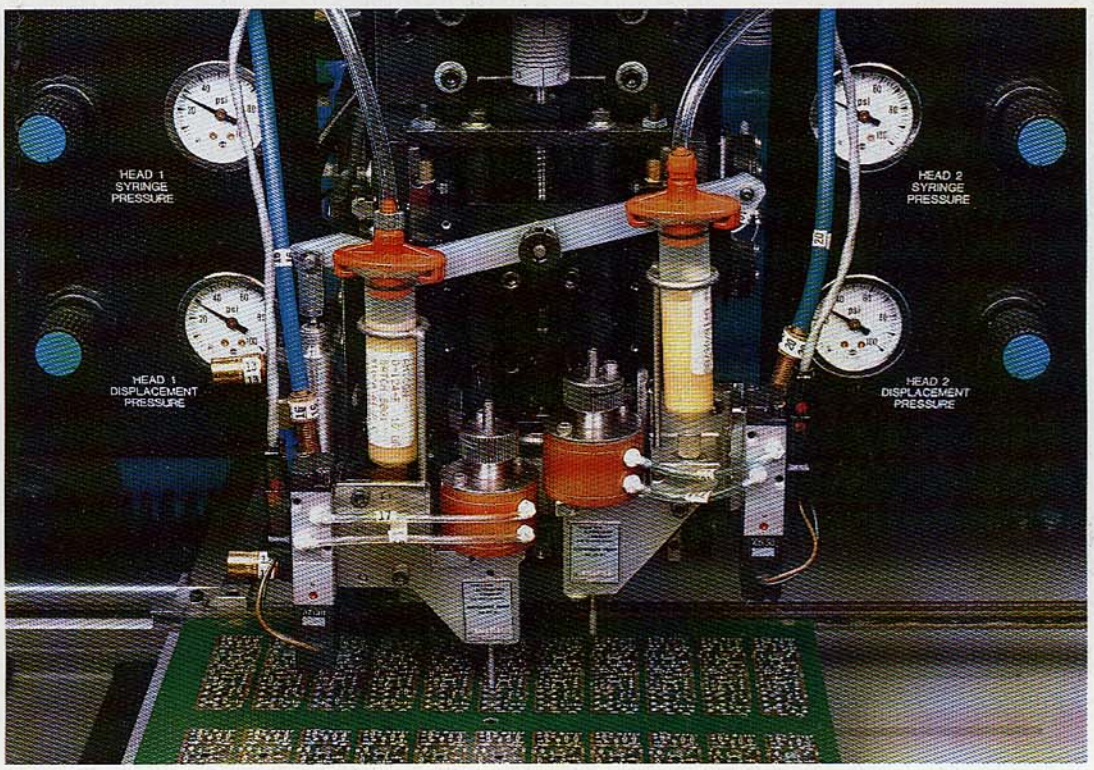
Se están aplicando para el montaje de SMD dos procesos principales que utilizan diferentes equipos y materiales. La figura 4 muestra la secuencia de las operaciones esenciales para el ensamble mixto.

En el lado de componentes, primero se aplica pasta de soldar en las zonas de adhesión mediante estampación al estarcido. Luego se posicionan los componentes, y se fijan por un proceso de soldadura de infrarrojos o reflujo de ola en fase de vapor. Este proceso debe utilizarse para SMD de alto número de terminales (portadores de circuito cerámicos sin terminales y plásticos con terminales, grandes circuitos integrados de pequeño contorno) con el fin de evitar un fuerte choque térmico.

En la cara de la soldadura, se empieza por aplicar gotas de pegamento con un aparato distribuidor y luego se colocan sobre tales gotas los componentes, que se fijan por soldadura de ola tanto si son SMD como convencionales.

Aparato distribuidor de pegamento
Los SMD han de ser adheridos a la placa impresa para fijarlos en posición antes de la soldadura. Tanto en el ensamble automático como en el manual, se depositan gotas de pegamento en la placa, se colocan en su sitio los componentes, y el pegamento se cura para asegurar una firme adhesión. Una de las dificultades consiste en determinar la posición exacta y el tamaño de la gota de pegamento; el adhesivo ha de sujetar firmemente el SMD pero no debe extenderse al área de soldadura.

Un buen pegamento se caracteriza por no ser conductor ni corrosivo y por su notable viscosidad antes del curado, su estabilidad química y una thixotropía tal que pueda aplicarse en gotas esféricas regulares sin desparramarse. Las compañías Alcatel usan adhesivos que se curan al calor.



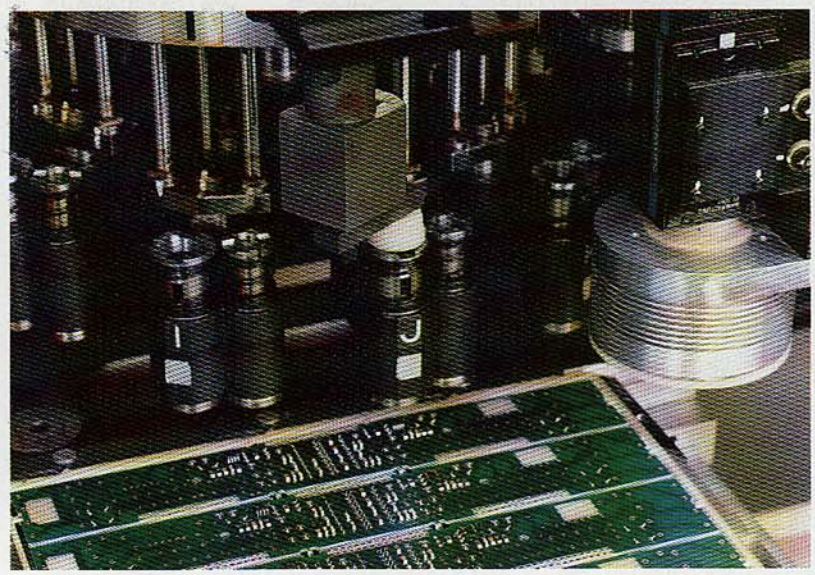
Estación de pegado para ensamble automático de SMD.

Equipo de estampación al estarcido
Existen técnicas de estampación al estarcido manuales y automáticas para estampar la pasta de soldar en las zonas de adhesión de la placa mediante el uso de una rejilla especializada. Se utilizan diferentes tipos de rejillas – malla de acero inoxidable, hoja

de metal galvanizado, etc. – según la cantidad de pasta que se necesite. La elección de las mejores pastas de soldar ha sido fruto de un cuidadoso estudio.

Equipo de posicionado
Se dispone de equipos de posicionado para todas las aplicaciones y con una extensa gama de capacidades. A título de ejemplo, varias compañías Alcatel han instalado una máquina cuya velocidad de inserción es de más de 8000 componentes por hora. Esta máquina ejecuta tres procesos en directo:

- Estación de pegado: equipada con dos distribuidores de pegamento de doble aguja, capaces de aplicar pegamento a dos placas simultáneamente. Cada distribuidor tiene una aguja sencilla y otra duplicada para uso con distintos tipos de componentes. La cantidad de pegamento se controla de forma precisa programando los tiempos de inyección en pasos de 0,01 s. La temperatura de la estación se mantiene a 28 °C para optimizar la viscosidad del pegamento.
- Estación de posicionado de SMD: tiene un cañón de 12 boquillas dobles que toman los componentes del alimentador, los sitúan bajo un sistema de reconocimiento en video controlado por ordenador para corregir su alineación, y luego los colocan sobre las gotas de pegamento.
- Horno de curado: proporciona un margen de temperatura estándar para cada placa. Un ciclo de curado UV de aproximadamente 20 s endurece el pegamento, y le sigue un ciclo de curado por infrarrojos. El proceso completo dura cerca de 2 minutos.



Estación de posicionado utilizada en la factoría de Eu para la producción de placas de abonado del sistema Alcatel E10.

Máquina de ensamble automático de la gama media
Alcatel SEL utiliza máquinas universales que trabajan según el principio de "recoger y colocar": con dos cabezas de ensamble móviles e independientes se obtiene una capacidad de 4500 componentes hora. La máquina se configura de modo que pueda ensamblar hasta 202 tipos de componentes sin paradas preparatorias.

Procesos de soldadura

Con la tecnología SMD, la ola de la máquina de soldadura envuelve a los componentes. Además, las terminaciones de los SMD son más pequeñas y no siempre quedan estañadas por el reflujo (p. ej., en los transistores de pequeño formato), con lo que hay un riesgo de mojado insuficiente (soldadura fría). De dos maneras se puede evitar este problema. La más corriente es la soldadura por doble ola: una primera ola "turbulenta" baña las terminaciones del SMD para conseguir una buena soldadura, y una segunda ola "suave" elimina el exceso de suelda. Como alternativa se puede aplicar una vibración en la superficie de la ola para asegurar un buen mojado de las conexiones. Actualmente existen máquinas que combinan ambas técnicas.

Los sistemas de soldadura por infrarrojos emplean radiación y convección de calor. Un procesador controla siete elementos calentadores individualmente, lo que permite establecer el perfil correcto de calentamiento para cada aplicación (p. ej., soldadura o curado del pegamento).

Con volúmenes de producción bajos, o alta densidad de SMD en la placa, la máquina de fase de vapor es una buena opción: proporciona una capa primaria de vapor saturado generada por un perfluorocarburo líquido calentado a 215 °C. Una capa secundaria de vapor compuesta por un líquido azeotrópico controla el vapor primario y reduce al mínimo la pérdida del polímero. Los dispositivos se montan en la placa utilizando pasta de soldar, y luego se introducen en el vapor secundario, en prevención del choque térmico, antes de someterlos al vapor primario durante 20 a 30 s. La placa vuelve después a la zona secundaria, donde se deja enfriar antes de extraerla.

El reflujo en fase de vapor permite un control preciso de la temperatura – limitada a la de ebullición del líquido primario – y un caldeo uniforme de los dispositivos sea

Línea de ensamble de SMD de alta capacidad.

cual fuere su tamaño; en atmósfera no oxidante, sólo permite el uso de fundentes de corrosión media.

Limpieza

Es necesario eliminar los residuos del fundente para soldar, y ello suele hacerse pulverizando disolvente a alta presión ya que el uso de ultrasonidos no es recomendable para algunos SMD. Como la limpieza es de capital importancia en la producción de dispositivos de alta fiabilidad, y los SMD de muchas terminaciones son más difíciles de limpiar que los componentes convencionales, se emplean máquinas de limpieza especiales.

Nuevas máquinas de soldadura por ola

Para lograr la máxima calidad posible y eliminar el uso de disolventes CFC, Alcatel SEL ha instalado una máquina de soldar por ola que emplea atmósfera de nitrógeno para evitar la oxidación de las soldaduras. Unos cierres a la entrada y a la salida impiden que el nitrógeno se escape de la máquina.

Los niveles de oxígeno se mantienen muy bajos en la zona de soldadura añadiendo una pequeña cantidad de ácido fórmico al nitrógeno para retener el oxígeno residual. Por ello no se necesitan ya los fundentes normales de fuerte contenido de resina, sino que pueden utilizarse fundentes bajos en resina con el resultado de una especial limpieza en la cara de soldadura de la placa de circuito impreso, que cumple los requisitos de pureza MIL sin ningún procedimiento adicional.

Inspección

Con tecnología de montaje superficial la inspección se hace más difícil porque los componentes son más pequeños, las placas tienen un empaquetamiento más denso, y la mayoría de los componentes discretos no tienen indicaciones marcadas. En cuanto a calidad de las soldaduras, las uniones soldadas son menores, a veces ocultas por el componente, y de diferente forma a las de componentes con terminales.

Algunas de estas dificultades pueden superarse durante el ensamble. Por ejemplo, la máquina universal de posicionado de componentes incorpora un equipo que prueba todos los SMD eléctricamente en valor y tolerancias antes del posicionado. Los componentes pueden ser de dos y tres terminales, tales como resistencias, condensadores, diodos, y transistores. El tiempo de prueba va incluido en el ensamble.

Se han tenido que modificar especificaciones de inspección como las normas de

calidad de mano de obra de Alcatel, para ajustarse a los requisitos de los SMD, definiendo por ejemplo los límites de aceptación para el posicionado de componentes y lo que se entiende por buena soldadura para una pastilla SMD.

Se puede aplicar un muestreo aleatorio a las placas SMD de forma similar a la aplicada en placas de tecnología convencional. La inspección visual de muestras aleatorias se realiza según el procedimiento AQL (nivel de calidad aceptable) acordado con el cliente. Si hay más faltas que las permitidas por las normas de calidad, se rechaza el lote completo. Los criterios de error para SMD se definen en las referidas normas de calidad para circuitos impresos de Alcatel.

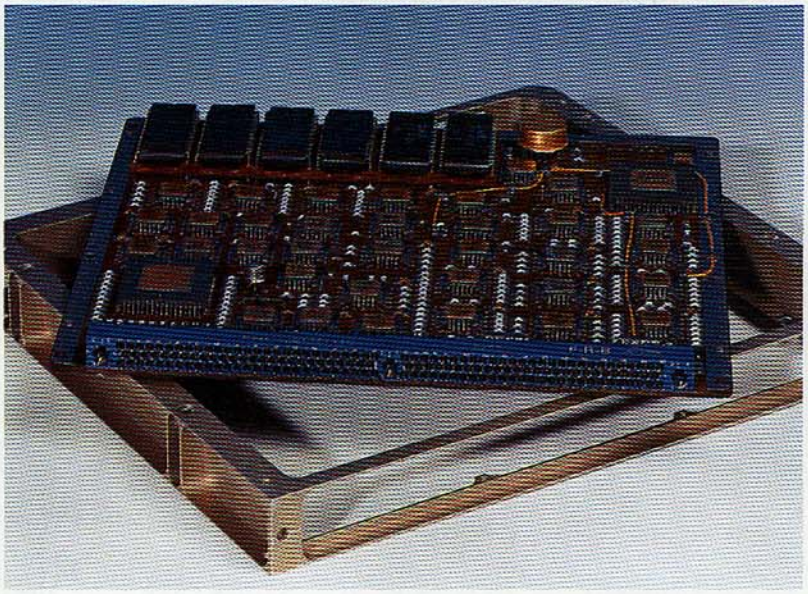
En aplicaciones espaciales y militares, que requieren fiabilidad particularmente elevada, se utilizan para inspección visual microscopios binoculares que permiten el examen de soldaduras situadas bajo los portadores de circuito.

La presencia de soldaduras en los cuatro lados de los encapsulados portadores de circuito y las pequeñas distancias entre los puntos de soldadura (que aumentan el riesgo de cortocircuitos) requieren un adiestramiento especial de los operarios.

Se están desarrollando varias técnicas para automatizar la inspección de las soldaduras, incluyendo el uso de láser y examen por rayos X o cámara fotográfica. Para hacer menos ardua la inspección a los operarios, Alcatel SEL ha introducido un microscopio de gran angular y foco regulable: este microscopio de proyección con tablilla de exploración ofrece un aumento total comprendido entre 6 y 40. Un disco dinascópico (disco rotatorio) proporciona una imagen tridimensional de alta calidad. La tablilla mencionada permite inspeccionar la imagen en direcciones X e Y utilizando una rejilla de alineación. Con un montaje óptico especial se pueden visionar los SMD desde todos los ángulos mediante un pequeño espejo interno de ajuste manual.

Prueba en-circuito

Alcatel Espace ha desarrollado facilidades de prueba en-circuito acomodadas a sus peculiares necesidades. Todos los componentes se prueban por completo, y las pruebas garantizan que la placa de circuito impreso cumple la especificación eléctrica. Esto es particularmente importante, pues la integración de una placa defectuosa supone retrasos y costes adicionales resultado de las reparaciones y la destrucción de dispositivos costosos. Estos medios son adecuados para bajos volúmenes de producción, típicos de la industria espacial.



Placa de microprocesador calificada para aplicaciones espaciales.

Se ha elegido un sistema móvil de prueba en-circuito, que ofrece una medición de impedancia en tres puntos (2 puntos de medida y 1 de guarda). El programa de prueba está gobernado por CAD, y la prueba dura de 5 a 10 minutos por placa, incluido el posicionado de la misma en el aparato de medida. Las pruebas se realizan a voltajes reducidos para asegurar que los componentes no sufran fatiga. La configuración del equipo de prueba puede modificarse rápidamente para probar nuevas funciones.

Las pruebas de placas miden los valores de los componentes pasivos con un 5% de precisión, y comprueban la posición correcta de los dispositivos activos.

Reparación

Existen dos procesos principales para reemplazar SMD defectuosos. En uno de ellos se insufla gas inerte calentado procedente de una central de gas en las uniones soldadas del dispositivo SMD. Por el contrario, otro proceso de modo térmico utiliza una cabeza de hierro, calentada por efecto Joule, que se aplica a la conexión soldada que sujeta el componente.

Los requisitos principales de estos procesos de reparación son que no haya reflujo de suelda hacia componentes adyacentes (ello debe tenerse en cuenta en las reglas de diseño), que el dispositivo a reemplazar no sea dañado por calor, y que el nuevo SMD no esté expuesto a temperaturas superiores a 150°C en su montaje. Además, los puntos de soldadura del nuevo componente deben ser fiables.

Ambos procesos necesitan operarios expertos para asegurar un posicionado

exacto del SMD y una mínima fatiga del componente.

Calificación

La introducción de tecnología de montaje superficial precisa que los componentes, placas y materiales estén calificados, así como el proceso mismo. Esto se ha realizado en Alcatel diseñando placas especiales de calificación, con el objetivo de realizar todas las pruebas y mediciones necesarias para garantizar que el proceso es seguro y ofrece la mejor calidad posible.

Las pruebas de calificación comprenden:

- pruebas mecánicas (choques, vibraciones, sacudidas, flexiones, torceduras, etc.)
- pruebas climáticas (variaciones rápidas de temperatura, humedad, etc.)
- maduración
- mediciones eléctricas
- prueba de contaminación iónica en residuos de soldadura
- inspección visual.

Algunos clientes, como el CNET en Francia, han tomado la iniciativa en las pruebas de calificación. Y esto sucede sobre todo en las aplicaciones espaciales. Alcatel Espace ha recibido la aprobación final del CNETS y de la ESA por su tecnología de ensamble al cabo de un periodo de calificación de dos años. El documento de identificación de procesos así generado es recibido cada dos años por las entidades correspondientes.

Conclusiones

Los SMD se han introducido con éxito en muchas compañías Alcatel y han aportado una serie de ventajas, tales como un proceso de fabricación reproductible con máquinas automáticas de elevada capacidad y una gran calidad y fiabilidad de los productos.

Para lograr tales beneficios, fue importante el diálogo continuado entre los responsables de diseñar productos, definir procesos, y seleccionar y especificar componentes. Esta intensa cooperación es esencial para una satisfactoria introducción de la tecnología de montaje superficial.

La calidad es y será prioritaria. Clave de su logro ha sido el adiestramiento de los operarios de la línea de ensamble, asegurando que poseen la maestría necesaria para trabajar eficazmente con la nueva tecnología.

Como la fabricación está en evolución permanente, es necesario poder producir equipos que incorporen distintas tecnologías. Como ejemplo, aunque se prefiera el uso exclusivo de componentes SMD, no todos los tipos de componentes existen en esta nueva tecnología de encapsulado. En el futuro se utilizarán la TAB (soldadura automática por cinta), los portadores de circuito con alto número de terminales, las pastillas sobre la placa y las resistencias impresas, exigiendo nuevos cambios en los equipos y procesos de fabricación. Alcatel introduce estas tecnologías con un enfoque innovador, en lugar de esperar a que sean adoptadas por otras compañías. En definitiva, la fabricación eficaz es parte esencial de la implantación de cualquier producto.

Pierre Meesemaecker nació en 1957. Tras graduarse en el Institut Supérieur d'Electronique du Nord en Lille, ingresó en el grupo de telefonía de Thomson CSF como ingeniero de pruebas de producción, y participó en el lanzamiento del sistema de conmutación digital Alcatel E10 y en la realización de una estación automática de pruebas en-circuito. Desde 1985, el Sr. Meesemaecker es responsable de los métodos de fabricación en la división de conmutación de redes públicas de Alcatel CIT.

Wolfgang Rozumek nació en 1943 en Alemania. Se graduó en la Universidad de Karlsruhe y luego trabajó tres años en los Estados Unidos. A su regreso a Alemania, entró en SEL como especialista en nuevos métodos de producción, y fue encargado de iniciar la producción del Sistema 12 de conmutación digital. Posteriormente se trasladó a la planta de Mannheim donde fue responsable del departamento de ingeniería industrial, y en 1984 fue nombrado director de producción de dicha planta. El Sr. Rozumek pasó en 1989 al Advanced Manufacturing Technology Centre de Alcatel ubicado en Bélgica.

René Tarrieu nació en Grust, Francia, en 1954. Tras su graduación en el Institut des Sciences de l'Ingénieur de Montpellier, entró en el departamento espacial y de satélites de Thomson CSF, hoy Alcatel Espace, donde se hizo cargo del desarrollo de microelectrónica de híbridos para aplicaciones espaciales. Desde 1987 el Sr. Tarrieu ha sido responsable de tecnología de dispositivos de montaje superficial en el departamento tecnológico de Alcatel Espace.

Estrategias de prueba

La mayor presión sobre los departamentos de fabricación que resulta del acortamiento de los ciclos de vida tiene un considerable efecto en las actividades de prueba, obligando a elaborar estrategias nuevas y más eficaces para las pruebas. Alcatel ha desarrollado un nuevo concepto de ingeniería de pruebas que ayudará a los técnicos y a los gestores a responder a tales desafíos.

V. S. Andersen
Alcatel Kirk, Horsens, Dinamarca
G. Caratti
Alcatel Dial FACE, Milán, Italia
F. Mertens
Alcatel Bell Telephone, Amberes, Bélgica

Introducción

Cuando se desarrolla un producto nuevo, se pone un gran interés en el *tiempo de puesta en mercado* y en el *tiempo de producción*. El primer concepto constituye un objetivo estratégico, enfocado a combinar ciclos de vida cortos con reducción de costes y que sólo puede alcanzarse aunando los esfuerzos de muchas personas en distintos departamentos. En lo que concierne al departamento de diseño, las herramientas de CAD (diseño asistido por ordenador) y de simulación ayudan a reducir al mínimo el periodo de diseño, limitando tanto la duración de cada ciclo como el número de iteraciones necesarias para desarrollar un producto de alta calidad. Para que el departamento de ingeniería de pruebas vaya a compás de estas nuevas técnicas, sus tiempos de diseño deben también reducirse consecuentemente, y ello se consigue añadiendo facilidades de prueba al diseño y utilizando resultados obtenidos durante el ciclo de diseño del producto, como son los datos de CAD y de simulación. Ambos planteamientos requieren que el ingeniero de pruebas participe en el diseño desde las primeras etapas.

Figura 1
Posible secuencia de pruebas, desde la inspección de entrada hasta la prueba del sistema.

El "caudal de producción" guarda relación directa con el número de etapas de prueba y con la flexibilidad en el área de pruebas de fabricación. Los tiempos de preparación deben reducirse a lo indispensable y dedicarse más equipos de prueba al mismo producto para evitar que se produzcan cuellos de botella. Se pueden utilizar pruebas adaptativas para reducir los tiempos de prueba (algunas se hacen solamente por muestreo). También ayuda a mejorar la calidad del producto un sistema de recopilación de los resultados de pruebas.

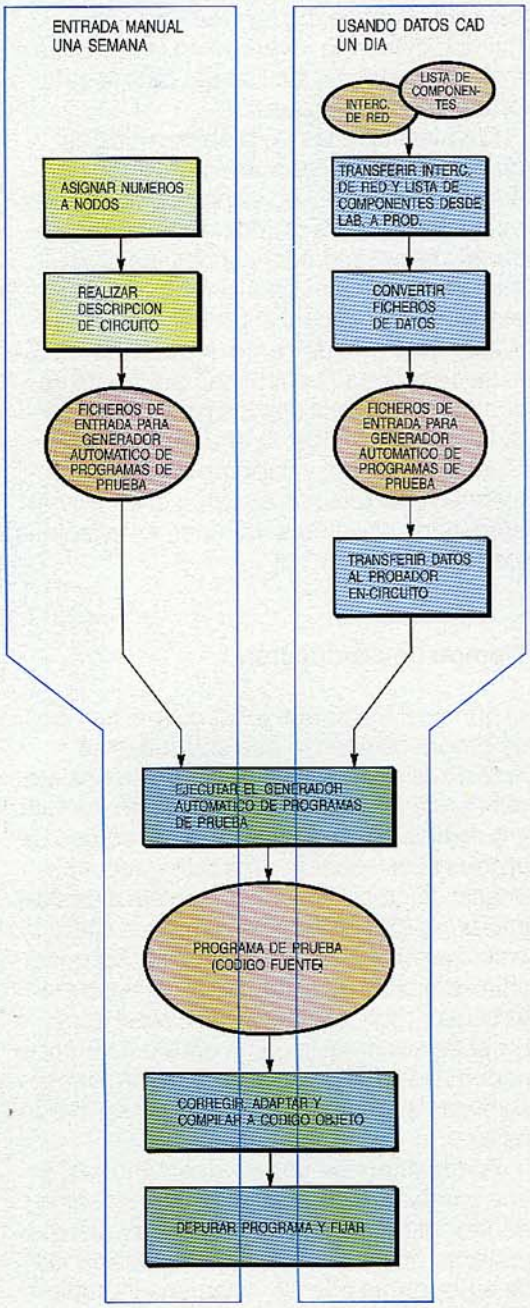
Juntar los requisitos de *tiempo de puesta en mercado* y los de *caudal de producción* en una estrategia de pruebas de un producto nuevo requiere evaluar en profundidad las diversas secuencias de prueba posibles. Se tiene, por consiguiente, que preparar un plan de pruebas para cada producto, definiendo la estrategia global a lo largo de todo el ciclo de vida del mismo así como las acciones que comporta.

Estas actividades de planificación adicionales para la ingeniería de pruebas, con el apremio de tiempo que suponen, hacen que sea esencial el soporte informático. Con el fin de prestar tal soporte se ha definido una estación de trabajo de ingeniería de pruebas (TEWS), en la que se combinan toda clase de aplicaciones para esta ingeniería y se ofrece a los departamentos de diseño, compras y financiero un acceso directo a los datos relevantes.

Tiempo de puesta en mercado

La actual exigencia de unos periodos de diseño cortos y una rápida introducción de los productos se intensificará en el futuro, y por ello la estrategia de pruebas elegida deberá reducir en todo lo posible los ciclos de desarrollo de equipos y programas de

Figura 2
Secuencia típica para el desarrollo de un programa de pruebas en-circuito.



prueba. La consecuencia es que la estrategia de pruebas debe utilizar equipos con los interfaces y herramientas informáticas necesarias para sustentar este planteamiento.

Condición previa para lo anterior es la temprana cooperación entre diseñadores e ingenieros de prueba, a fin de que todos los circuitos puedan probarse con las herramientas elegidas. La figura 1 muestra un posible esquema de pruebas, que incluye inspección de entrada, análisis de defectos de fabricación, prueba en-circuito, prueba funcional de placas y prueba de sistema. Durante la fase de planificación se decide si esas etapas de prueba van a utilizarse o no. Se están aplicando varios métodos para limitar el tiempo de desarrollo de cada etapa de las pruebas.

Para cada familia de componentes se define un nivel de calidad aceptable. Esa calidad se puede garantizar por tres procedimientos: certificación de calidad por el suministrador – que evita el disponer de equipos y programas de prueba en la propia factoría –, inspección de un número limitado de muestras si la calidad de las piezas recibidas está casi siempre dentro de lo especificado, y prueba al 100% cuando se exige una calidad superior a la que puede garantizar el suministrador del componente. En los dos últimos casos se necesitará un paquete informático de prueba de componentes; sólo en el caso de circuitos LSI a medida no existe tal programa en el mercado, y habrá de ser elaborado "en casa".

Dado que en paralelo con el propio desarrollo se elabora un programa de verificación del diseño y calificación, con esa base y un pequeño esfuerzo adicional el ingeniero probador podrá generar un programa adecuado para la inspección de entrada.

Análisis de defectos de fabricación y prueba en-circuito

Cuando se hace el trazado de una placa de circuito impreso nueva, se crean diversos ficheros de datos en el departamento de desarrollo. Transfiriendo los ficheros que sean relevantes al departamento de ingeniería de pruebas se puede ahorrar mucho trabajo en el desarrollo de programas de prueba y adaptadores (interfaces entre el equipo de prueba y la unidad a probar), ya sea para la prueba en-circuito o para el análisis de los defectos de fabricación.

La figura 2 muestra una secuencia típica para el desarrollo de un programa de prueba en-circuito. En el lado izquierdo de la figura se presentan las actividades a realizar cuando no se utilizan datos generados por CAD, debiendo entonces introducirse manualmente la lista de componentes y de sus interconexiones en el ordenador del sistema, el cual genera los ficheros de salida que serán tomados como datos base por el generador automático de programas de prueba.

Por el contrario, en el lado derecho de la misma figura se ilustran las actividades que se realizan hoy cuando se utilizan datos CAD. En este caso se transfieren las listas de componentes y de interconexiones desde el ordenador de desarrollo al ordenador principal situado en el área de producción, y allí son convertidas a los mismos ficheros de salida antes mencionados, ficheros que se transfieren finalmente al comprobador en-circuito o al analizador de defectos de fabricación y son utilizados por el referido generador automático de programas. El ahorro de tiempo conseguido utilizando datos CAD es de cuatro a cinco días

sobre un total de 20 a 30 días de trabajo para la prueba en-circuito de una placa compleja; es de alrededor de tres días sobre ocho para el programa de análisis de defectos de fabricación y la preparación de información para el adaptador de pruebas. Además de esto, se eliminan omisiones y errores humanos, mejorándose la calidad.

Prueba funcional de placas

Como los departamentos de desarrollo utilizan cada vez más herramientas de simulación para diseño y verificación de diseño de placas digitales, mucha de esa información puede utilizarse para prueba funcional de placas. Estos datos, que incluyen descripción de circuito, configuraciones de entrada y configuraciones de salida, se transfieren al departamento de ingeniería de pruebas donde se utilizarán como entradas para un generador automático de programas de prueba que es parte de los modernos comprobadores funcionales de placas.

A menudo se utilizan soluciones parciales en las que se prueban por separado bloques funcionales, evitando tener que modelar todos los componentes. Ello reduce considerablemente los tiempos de programación frente a los de introducción manual de datos al equipo de prueba funcional de placas. El uso de herramientas de simulación añadidas al programa de pruebas *sí/no* constituye una excelente herramienta de diagnóstico que ayuda al operario a localizar fallos utilizando una sonda dirigida. El programa solicita la medición en puntos específicos del circuito, compara las medidas con los valores esperados basados en los resultados de la simulación, y determina el componente defectuoso.

La prueba funcional de placas complejas equipadas con microprocesadores es una tarea importante para la ingeniería de pruebas, aun con un equipo grande que utilice datos de simulación. En tal caso suele ser más fácil y rápido preparar una prueba funcional mediante un equipo emulador. Como soporte lógico de la prueba se utiliza entonces una modificación del propio del producto, acortando así el desarrollo de la prueba.

Prueba de sistema

Alcatel produce un gama extremadamente amplia de equipo de telecomunicación. Sin lugar a duda, hay considerables diferencias entre la prueba de sistema de un aparato telefónico y la de una central o un sistema de microondas, por lo que el equipo de prueba debe variar marcadamente de un tipo de producto a otro. Sin embargo, en todos los casos es importante que el producto se haya diseñado con buena aptitud para las pruebas, de tal modo que sea mínimo el tiempo invertido en las mismas e incluyendo tantas facilidades para la autoprueba como sea posible.

Una ventaja más de la autoprueba es que, en el creciente número de casos en los que el diagnóstico es parte del funcionamiento normal, se reduce grandemente el trabajo necesario para escribir los programas de operación. Esto conduce a una estrategia por la cual el producto final, aunque sea tan grande como una central telefónica, se prueba "en fábrica" dentro de su configuración final con los programas operacionales incluidos, lo que asegura una rápida instalación y suprime cualquier problema de correlación que pudiera surgir al probar con diferentes métodos en la factoría y en la instalación.

Tiempo de producción

El principal factor que influye en el tiempo de producción, en lo que a pruebas se refiere, es el número de etapas necesarias para comprobar la conformidad del producto y la flexibilidad de adaptación del equipo de prueba al uso con un producto nuevo. Es esencial una calificación completa antes de iniciar la producción para demostrar que unas pruebas realizadas en cualquier condición admisible de alimentación y temperatura sean representativas, tomadas como pruebas *sí/no*, de la gama entera de ambos parámetros. Un primer e importante ahorro es evitar las pruebas en condiciones marginales.

Puede seguirse uno de dos métodos, o una combinación de ambos, para limitar el número de etapas de prueba. Uno de ellos consiste en incluir en el diseño facilidades de autoprueba que permitan una inmediata declaración *sí/no* a nivel funcional, suprimiendo así una etapa intermedia. El otro separa la etapa de prueba donde se detectan fallos de la etapa en la que se los localiza, con lo que se ahorra para la mayoría de las placas la etapa de localización del fallo, y además la reparación de las placas afectadas se efectúa en la estación de trabajo más eficiente.

El procedimiento más seguro es utilizar inicialmente todas las etapas de prueba y adquirir confianza en la cobertura y nivel de calidad del producto antes de suprimir ninguna de ellas, confianza que sólo se consigue mediante una continua vigilancia de la calidad. Con esta finalidad (Fig. 3) se ha elaborado un sistema de recopilación de datos de prueba, que recoge y manipula los resultados de las pruebas y genera informes que puedan servir de base a las acciones correctoras. En los casos en que no se

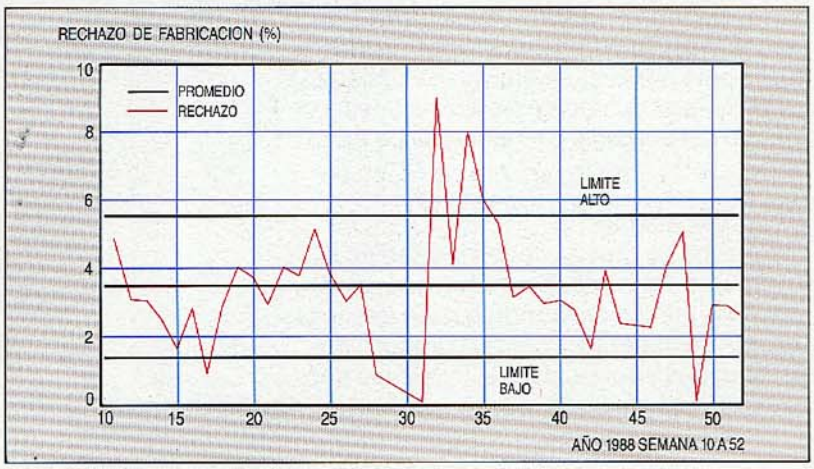


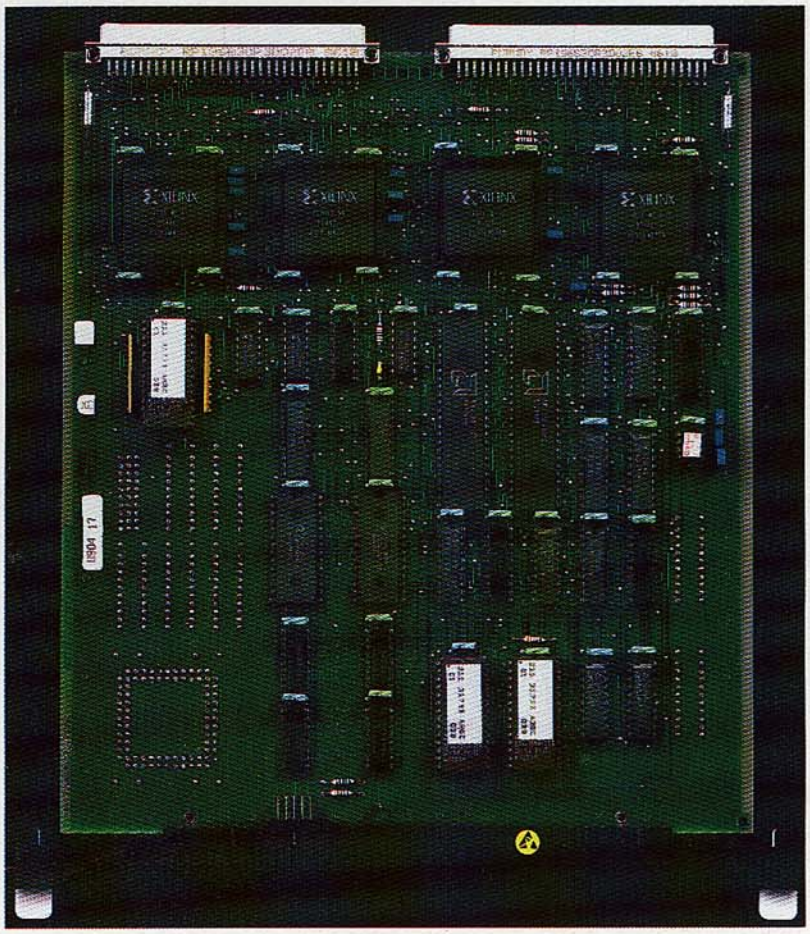
Figura 3
Sistema de captura de datos para vigilar la calidad del producto.

pueda prescindir por completo de una prueba, se podrá lograr una mejora menor (sobre todo en coste) utilizando técnicas de muestreo dinámico también llamadas *prueba adaptativa*. La extensión de una prueba dependerá entonces de la calidad media de cada parámetro, calidad vigilada por un proceso de muestreo cuyo índice de repetición va asociado a la etapa de prueba en curso.

La flexibilidad se puede enfocar de diferentes maneras: la facilidad con que se puede cambiar de producto en un mismo equipo de pruebas, o bien cambiar de equipo para probar el mismo producto, o incluso pasar de un producto a otro a los operarios y técnicos en diagnóstico. El primer enfoque depende principalmente de los procedimientos de preparación del equipo cuando se cambia de un producto a otro, apuntando a evitar en todo lo posible modificaciones en la parte física del equipo. Pueden hallarse soluciones a este problema en un armazón de tipo general que utiliza una "tarjeta de personalidad" para cada tipo de placa, o en un conjunto de puntos de prueba fijos para el análisis de defectos de fabricación o la prueba en-circuito, o en placas de interfaz físico programable basadas por ejemplo en ordenaciones de células lógicas, dependiendo la función de la placa interfaz de la secuencia de datos enviados por el microprocesador que controla el equipo de prueba.

Aunque no siempre sea esencial la capacidad de utilizar diferentes equipos de prueba, merece la pena examinar las posibilidades y los efectos de tal contingencia con el fin de estar preparados para posibles cuellos de botella y hallar soluciones alternativas. Por su parte, la flexibilidad del personal de prueba y reparación vendrá determinada por los conocimientos que requieran comparados con lo que pueden aportarles los equipos de prueba utilizados. Los sistemas expertos y de sondeo dirigido ofrecen dos ventajas: flexibilidad en los momentos de plena producción, y una permanente disponibilidad de los conocimientos relativos a reparaciones, aun cuando el producto ya haya dejado de fabricarse.

Placa de interfaz físico programable para el comprobador de placas de procesador Sistema 12.



Una clave: la planificación de las pruebas

Planificación de las pruebas

Los equipos electrónicos de telecomunicación se pueden probar de muchas maneras y con numerosos instrumentos. La elección de las etapas de prueba y su secuencia se basa en un conjunto de reglas de cálculo, además de ciertos datos generales y otros específicos del producto. Mientras las reglas y datos generales permanecen más o menos constantes, los datos específicos del producto, como son los cambios en cantidad y calidad de la producción, son funciones del tiempo. Por lo tanto, la secuencia óptima de pruebas es también función del tiempo. Esto conduce a definir el "plan de pruebas" del siguiente modo: *plan escrito que define todas las pruebas a realizar en todas las fases de la producción, desde la inspección de entrada hasta la instalación, la evolución prevista en la*

calidad y las acciones orientadas a lograrla, así como cualquier adaptación de la secuencia de pruebas resultado de lo anterior.

Preparación del plan de pruebas
Se necesitan tres bloques de información para preparar un plan de pruebas:

- especificaciones de mercado, cronograma de ingeniería, fecha de inicio de la producción, evolución de las cantidades a fabricar por año
- especificaciones de diseño, descripciones de producto, listas de piezas, tasas de fallo de los componentes, tasas de fallo en fabricación y pruebas, complejidad de los dispositivos a probar, recursos disponibles y requeridos
- aptitudes del personal de ingeniería de pruebas, dotación de operarios para prueba y diagnóstico de fallos, equipos para pruebas *sí/no* y localización de fallos, trabajo de diseño estimado para las facilidades de prueba específicas, tiempo de prueba estimado.

El proceso de estos datos, junto con el coste asociado, conduce a una o más soluciones posibles que habrán luego de evaluarse en el aspecto económico. El Advanced Manufacturing Technology Centre de Alcatel ha redactado un documento denominado *Directrices para la preparación de planes de prueba de productos*, que contiene instrucciones y fórmulas completas para esta evaluación y explica cómo elegir enfoques y soluciones alternativas para las pruebas.

Adición del factor "tiempo"
Para el momento de arranque de la producción y los primeros meses siguientes se ha de elaborar un plan inicial, en el que se incluya la tasa de fallos esperada. Al principio se considerarán tanto pruebas funcionales manuales como automáticas. Por supuesto, las cantidades producidas en los comienzos pueden ser bastante bajas, haciendo inaceptablemente elevadas las inversiones en equipos automáticos y/o en trabajo de ingeniería de pruebas. Se elegirá pues la solución más económica.

Puesto que la tasa de rechazo inicial suele ser más alta que el objetivo previsto, se habrá de elaborar un plan para reducirla. Ello se puede conseguir mejorando los procesos en las distintas fases de la producción, trasladando las pruebas a etapas anteriores (existentes o nuevas), o por ambos procedimientos. La mejora de calidad y el aumento del volumen de producción puede dar lugar a una nueva secuencia de pruebas óptima que obligue a recalcular el plan de pruebas usando los nuevos datos. Dependiendo de la evolución de la calidad y del volumen de producción, habrá que repetir o no este ejercicio. Se obtiene así un control óptimo de las inversiones y del uso del personal de ingeniería de pruebas.

Otras aplicaciones
Los planes de prueba deben indicar, en el flujograma del proceso de fabricación, todos los puntos de comprobación desde la entrada de materiales hasta la producción de unidades y subunidades. Para cada uno de ellos se deberá indicar las tasas de fallo esperadas, antes y después de la prueba prevista, sobre la base de datos obtenidos de sistemas modelo de calidad (si existen) o en valores medios tomados de procesos similares. En unos pocos casos, las evaluaciones realizadas durante la planificación de las pruebas hacen esperar unas tasas de fallos tan elevadas en el proceso considerado que la diagnosis y la reparación no resultan económicas. Se pasa entonces tal información a la ingeniería de fabricación al efecto de que traten de mejorar o modificar el proceso para conseguir tasas de fallo aceptables, evitando los altos costes de pruebas y reprocesos.

En otros casos, la mayor complejidad del equipo puede hacer costosa e impracticable la prueba de todas las posibles combinaciones de entradas y salidas. El plan permite localizar las pruebas de las diferentes funciones en la etapa más apropiada, reduciendo así al mínimo el coste de verificar las prestaciones de componentes, subunidades y sistemas.

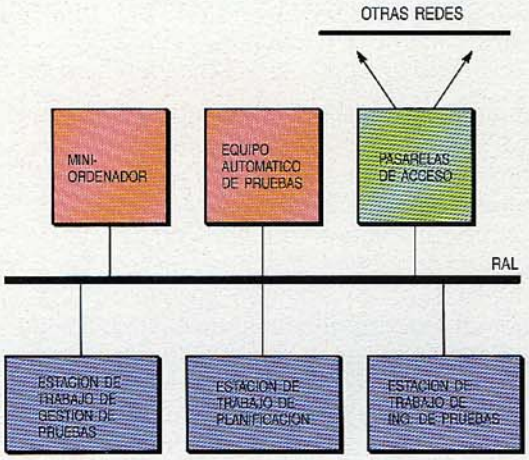


Figura 4
Arquitectura de la estación de trabajo de ingeniería de pruebas.

Estación de trabajo de ingeniería de pruebas

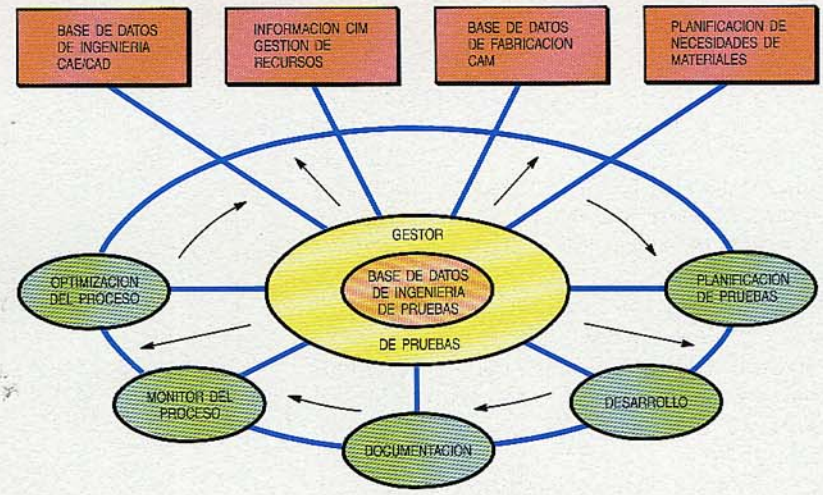
Las actividades de pruebas se caracterizan especialmente por ser repetitivas, involu-

crar diferentes productos y requerir datos de otros departamentos. Estos datos frecuentemente residen en diversas bases de datos, algunas de las cuales tal vez pertenezcan al entorno de fabricación integrada por ordenador, que pueden estar almacenadas en distintos tipos de ordenadores. Es claramente ventajoso el soporte de ordenador para estas actividades, pero el uso de bases de datos diferentes que se ejecutan en distintos ordenadores y que se diseminan entre numerosas compañías Alcatel hace imposible definir una realización única, tanto en equipo físico como en soporte lógico. Para superar este obstáculo se ha definido el concepto de "estación de trabajo de ingeniería de pruebas" (TEWS, test engineering workstation), que describe los requisitos para aplicaciones de interés en el entorno de la ingeniería de pruebas. El grado de implantación del concepto general depende de cada compañía concreta.

Arquitectura y estructura de la TEWS

En la figura 4 se presenta la arquitectura de una TEWS. Cada función (gestión, planificación, ingeniería) tiene acceso a sus aplicaciones correspondientes – por ejemplo, generación del plan de pruebas o del programa de pruebas – a través de su estación de trabajo especializada. Las aplicaciones pueden ejecutarse en las estaciones de trabajo, en ordenadores conectados a la RAL (red de área local), o incluso en un ordenador no conectado a la RAL a través de una pasarela de acceso.

Figura 5
Gestor de pruebas, que forma el núcleo de la estación de trabajo de ingeniería de pruebas.



La figura 5 muestra el núcleo, denominado gestor de pruebas, que contiene el sistema operativo, enlaces con bases de datos externas y una base de datos local. Se ilustran algunas aplicaciones que pueden ser invocadas por el gestor de pruebas y que, a través del mismo, tienen acceso a cualquier base de datos.

Aplicaciones

Se han definido tres áreas de aplicación: gestión de pruebas, planificación de pruebas e ingeniería de pruebas.

La TEWS aporta una herramienta de gestión de las pruebas para planificación y seguimiento de programas y equipos de pruebas, así como para elaborar presupuestos. En el primer caso, las entradas procedentes de la planificación del negocio, plan de fabricación, plan de pruebas y programa de ingeniería se convierten en un cronograma de desarrollo. La planificación de presupuestos arranca de los resultados de la etapa anterior y define las necesidades presupuestarias a corto y largo plazo, en inversiones y mano de obra.

En el área de planificación de pruebas, la TEWS incorpora un programa de ordenador capaz de generar un plan de pruebas para cualquier producto, a partir de los datos aportados por la planificación del negocio, la información de CAD sobre las placas y los datos sobre las máximas tasas de fallo de componentes y procesos de fabricación. La evaluación de estos datos junto con la eficacia de las pruebas realizadas por los diferentes equipos permite hacer una elección óptima.

En cuanto a la ingeniería de pruebas, la TEWS esencialmente integra herramientas informáticas comerciales con los equipos de prueba. Así ocurre ciertamente con el analizador de defectos de fabricación, para el que existe en el mercado un completo abanico de programas que convierten los datos CAD en datos para programas e interfaz de pruebas. Para el probador funcional de placas se utiliza el mismo simulador que en el departamento de diseño, reduciendo así al mínimo el trabajo de generación o adaptación de los vectores de prueba. En el caso de equipo de prueba automático, uno de los principales requisitos es un postprocesador adecuado para el simulador elegido. El paquete de programas de pruebas de sistema a menudo se desarrolla en otro departamento, y todo lo que hay que hacer con él es montarlo con otros programas de prueba y cargarlo en la estación de trabajo de ingeniería.

La TEWS incorpora también un programa que a partir de los datos CAD y de un conjunto de reglas sobre la aptitud para pruebas, proporciona información sobre la calidad del diseño en lo que a capacidad de ser probado se refiere.

Conclusiones

El ingeniero especializado ha de tener en cuenta numerosos parámetros al definir la estrategia de pruebas para un determinado

producto. Es evidente que no existe una estrategia de pruebas "única", y que lo importante es disponer de una estrategia para cada producto, planificando su evolución en el tiempo. El conjunto de ellas permitirá garantizar un permanente control de los resultados del departamento de pruebas, en línea con los objetivos de la Compañía.

Vagn Skov Andersen nació en Dinamarca, en 1944. Se graduó ingeniero electrónico en 1974, y trabajó después en el departamento de electrónica aeronáutica de SEK en Horsens, donde fue responsable de la transferencia de equipos de prueba de General Dynamics Electronics a SEK. En 1981 entró en Terma Electronic en Aarhus como jefe de ingeniería de pruebas, para volver a SEK (hoy Alcatel Kirk) en 1985. El Sr. Andersen es actualmente jefe de ingeniería de pruebas en Alcatel Kirk, responsable de todas las actividades de esta ingeniería.

Giovanni Caratti nació en 1947 en Palazzolo, Udine, Italia. Desde 1970 trabaja en Alcatel FACE. Fue responsable de la ingeniería de pruebas de sistemas de comunicaciones de empresa hasta 1985, y ahora tiene a su cargo la calidad en ese mismo grupo de Alcatel Dial FACE.

Frank Mertens nació en 1953 en Schoten (Amberes), Bélgica. En 1977 se graduó en electrónica por la Universidad católica de Lovaina, y al año siguiente ingresó en BTM (hoy Alcatel Bell Telephone) donde trabajó en diseño de facilidades de prueba para centrales Sistema 12. En 1983 el Sr. Mertens se trasladó del departamento de ingeniería a la división de operaciones, donde ahora dirige el departamento de ingeniería de pruebas del Sistema 12.

Sistemas expertos para aplicaciones de fabricación y pruebas

La diagnosis de fallos fue una de las primeras aplicaciones de los sistemas expertos, que han sido muy utilizados para probar productos complejos como las placas de circuito impreso del Sistema 12. Hoy día, también hay (o están en desarrollo) sistemas expertos para utilizar en el difícil campo de planificación de la fabricación.

W. Frank
Alcatel SEL, Stuttgart, República Federal de Alemania
B. Sauve
Laboratoires de Marcoussis, Marcoussis, Francia

Introducción

El proceso del conocimiento es un complemento lógico de las técnicas convencionales de tratamiento de datos, y ofrece nuevas oportunidades de realizar procesos de fabricación y pruebas asistidos por ordenador. Los sistemas expertos, que se benefician del proceso del conocimiento, pueden contribuir notablemente a la puesta en práctica del concepto de fabricación integrada por ordenador (CIM, computer integrated manufacturing). Alcatel viene utilizando con éxito sistemas expertos para aplicaciones de fabricación y pruebas durante bastantes años. Por ejemplo el DIAESS (envoltura de sistemas expertos para diagnosis) ha sido concebido como ayuda a la generación de sistemas expertos para diagnosis de fallos. Alcatel utiliza también sistemas expertos en otras áreas de la fabricación. Así, SONIA es un sistema de planificación de tareas en fábrica que sirve para programar y controlar actividades de fabricación a corto plazo, y además se está desarrollando un sistema generativo de planificación de procesos integrado en el proyecto Eureka, con la intención de utilizar datos de diseño para planificar los procesos de fabricación según las piezas y su secuencia.

Diagnosis de fallos con el DIAESS

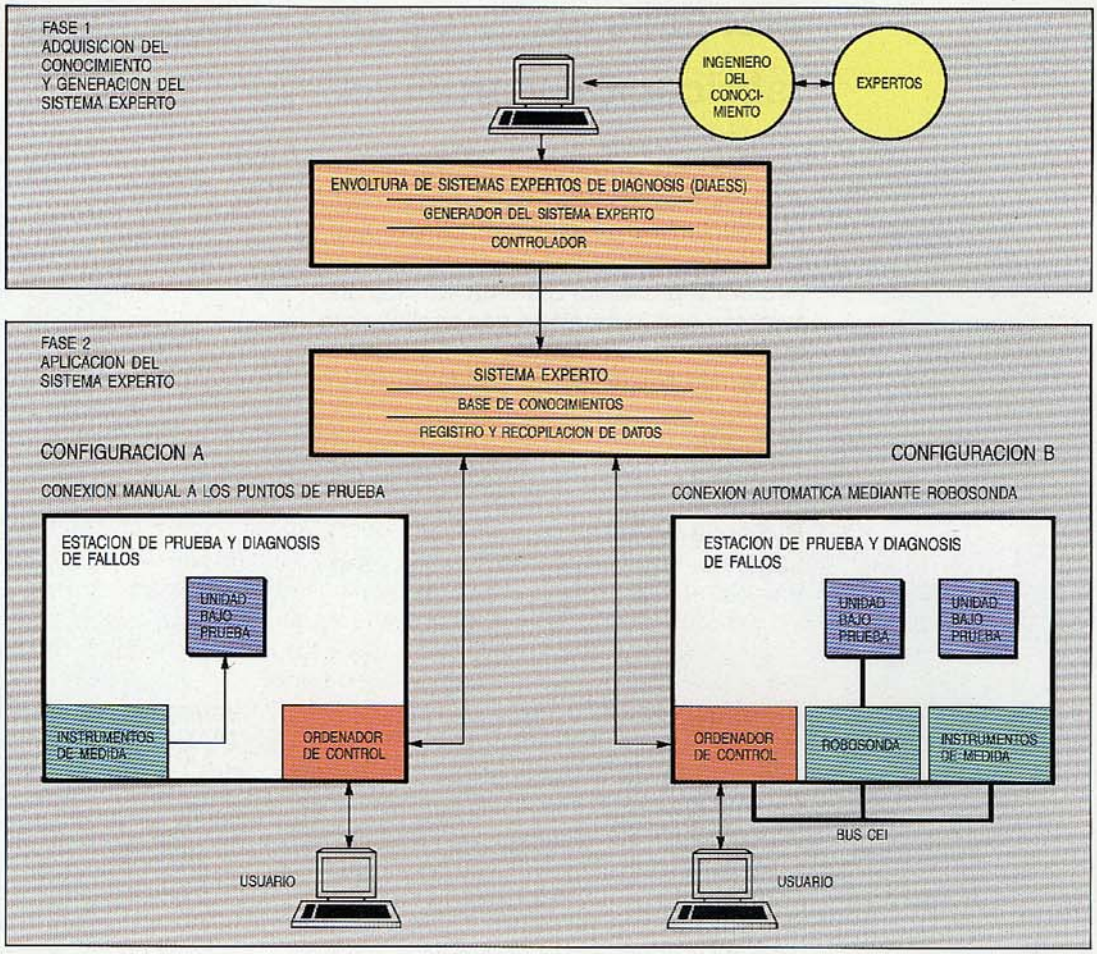
El DIAESS es una herramienta acreditada para la generación de sistemas expertos, en particular para la diagnosis de placas de circuito impreso (PBA) defectuosas. Está basado en la envoltura EXTRAN desarrollada en la Universidad de Edimburgo en estrecha cooperación con Alcatel[1]. Tanto el DIAESS como los sistemas expertos basados en reglas que genera, se ejecutan en ordenadores comerciales, por lo que no se necesita ningún equipo especial, característica importante cuando dichas herramientas han de ser integradas en un entorno CIM.

Existen dos formas principales de popular la base de conocimientos. Una consiste en que el ingeniero del conocimiento introduzca en forma de ejemplos los conocimientos respecto a la aplicación. El DIAESS utiliza entonces su algoritmo de inducción para generar reglas que representen este conocimiento, las cuales debe revisar el ingeniero para asegurarse de que son suficientes y, si fuere necesario, aportar ejemplos adicionales. La otra manera es que dicho ingeniero defina las reglas de forma explícita y las introduzca mediante una sintaxis fácil de utilizar y entender.

En cuanto las reglas sean satisfactorias, el generador de sistemas expertos DIAESS las traduce a subrutinas de Fortran 77. Se pueden incluir, y llamar para su ejecución en cualquier instante, todas aquellas subrutinas externas (para realizar, por ejemplo, cálculos numéricos u otras tareas) escritas en cualquier lenguaje que se ejecuten bajo el mismo sistema operativo. Todas las subrutinas compiladas se enlazan al controlador del DIAESS, con lo que el sistema experto resultante queda listo para su utilización (Fig. 1: fase 1).

Toda la información textual referente a cada aplicación – preguntas, instrucciones, aclaraciones – se guarda en un fichero independiente. Además, un fichero de mensajes permite traducir todos los mensajes, órdenes, respuestas, etc. del inglés (fuente) a cualquier otro idioma. Finalmente,

Figura 1
Generación y aplicación de sistemas expertos para la diagnosis de fallos.



una parte de registro/recopilación de datos almacena todos los datos relevantes de cada dispositivo diagnosticado y cada sesión de diagnóstico. Una sesión se puede interrumpir en cualquiera de sus fases, y recogerse a efectos estadísticos los datos pormenorizados: número de diagnósticos y sus resultados, fecha, etc.

Aplicaciones y experiencia

Para asegurar la calidad de sistemas complejos como las centrales digitales, se requiere probar en un cierto número de etapas de fabricación, desde la inspección de entrada de los componentes hasta la prueba del sistema completo. La prueba automática de los componentes eléctricos, de las PBA, de las unidades funcionales y de las centrales completas, es parte integrante del proceso de fabricación de centrales Sistema 12. No obstante, la evolución tecnológica y la necesidad de equipos especiales (por ejemplo, un módulo funcional acoplado a un ordenador de control y a ciertos instrumentos de medida) para probar y diagnosticar a nivel funcional PBA complejas, impone fuertes exigencias a la habilidad del personal que efectúa las pruebas. Aparte de un conocimiento fundamental de los circuitos eléctricos, de las funciones de las PBA y del manejo de los instrumentos de medida, el diagnóstico requiere la capacidad de localizar la avería siguiendo etapas razonadas.

La tecnología de sistemas expertos es adecuada para almacenar en una base central de conocimientos todos aquéllos que sean relevantes para el diagnóstico. Ello permite a los ingenieros menos experimentados aprovecharse de la pericia de los expertos, haciendo por tanto más rápidos los diagnósticos. El DIAESS se ha utilizado para generar sistemas expertos que diagnostiquen PBA complejas del Sistema 12 (placas de elementos de control, enlaces digitales y líneas analógicas).

Tras un día de aprendizaje sobre la utilización de un sistema experto, un técnico ayudado por el sistema es capaz de localizar fallos en placas complejas. Al iniciar la sesión, el técnico introduce el número de serie de la PBA mediante un terminal o un lector de código de barras. Dependiendo de las facilidades de conexión y de control de la estación de prueba/diagnosis, la sesión puede requerir un diálogo entre usuario y sistema (Fig. 1, configuración A) o bien estar completamente automatizada (configuración B). El resultado es la información sobre un fallo determinado (por

ejemplo, cambie el componente 7D12), o la instrucción "llame al experto" en caso de no llegar a una conclusión clara. Si ocurre esto último, entonces el experto tras diagnosticar la avería introduce en la parte de registro/recopilación de datos del sistema toda la información relacionada con el fallo y con sus síntomas, de forma que pueda ser utilizada por el ingeniero del conocimiento para actualizar la base de conocimientos (Fig. 2).

En las aplicaciones existentes, el tiempo medio para diagnosticar un fallo se redujo en torno a un 50% al utilizar un sistema experto, siendo localizados aproximadamente el 80% de los fallos[2]. Esto representa un compromiso razonable entre el coste de construir y actualizar una base de conocimientos y su rendimiento.

La formación de un ingeniero del conocimiento ocupa unas dos semanas: una para el aprendizaje general del DIAESS, y otra para la adquisición del conocimiento y la generación de un primer sistema experto de aplicación concreta. Entre las aplicaciones más recientes figuran sistemas de diagnóstico de fallos en discos Winchester y en una placa multiplexora de 2/8 Mbits.

Sistema para planificación generativa de procesos

Siempre hay necesidad de mayor eficacia en la planificación de procesos y mejor calidad de la planificación misma (expresada por la calidad del producto, los costes de fabricación, el tiempo de producción, etc.). Dada la cantidad de datos a procesar y mantener actualizados, tal necesidad sólo se puede satisfacer con la ayuda de un ordenador. En consecuencia, la planificación de procesos asistida por ordenador (CAPP, computer-aided process planning), interfaz entre las funciones tecnológicas y las administrativas, está cobrando cada vez más importancia.

La planificación del proceso para piezas mecánicas pretende generar un plan detallado sobre el modo de fabricarlas a partir de los datos del diseño – planos, lista de materiales, número de piezas a producir – y de las tecnologías disponibles en fábrica. Abarca la planificación de todos los procesos de fabricación: selección de operaciones (por ejemplo, fresado, taladrado, escariado) y de la secuencia en que se realizan, de máquinas, de dispositivos y herramientas de sujeción, generación de datos para programación del control numérico, y cálculos de tiempos de ejecución.

Se pueden distinguir tres métodos de planificación del proceso:

- *Planificación adaptativa*: un plan de proceso ya existente para una pieza similar se vuelve a utilizar "adaptándolo" a la nueva pieza.
- *Planificación por variantes*: se genera un nuevo plan de proceso a partir de un plan estándar (secuencia ordenada, permanentemente establecida, de pasos de fabricación para una familia de piezas), variando los parámetros dentro de límites estipulados. No existen nuevos requisitos sobre materiales, herramientas, equipos de producción o tecnologías.
- *Planificación generativa*: se establece un nuevo plan de proceso para cada producto. Un sistema generativo debe producir una secuencia óptima de operaciones de fabricación utilizando una serie de algoritmos de decisión más refinados y sofisticados. Toma su entrada de un modelo CAD en 3D y de una amplia base de datos de tecnología[3].

Dada su complejidad, la planificación de procesos es todavía uno de los puntos más débiles en la automatización del proceso de fabricación global. La mayoría de estos sistemas de planificación admiten planificación por variantes, por lo que tienen un campo de aplicación limitado[4,5]. La planificación generativa es una de las cuestiones más importantes en la investigación sobre inteligencia artificial, teniendo posibilidad de incluir o suplantar al resto de los métodos de planificación.

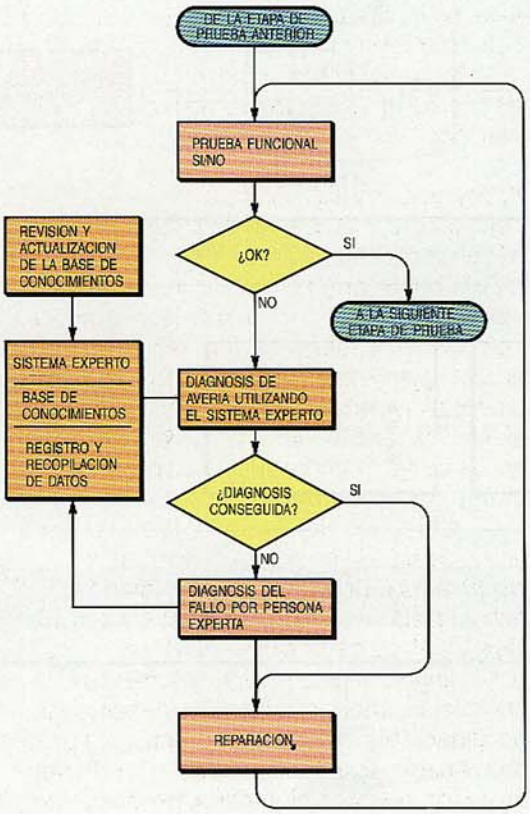


Figura 2
Diagnosis por medio de un sistema experto y actualización de la base de conocimientos.

Concepto del sistema

En el marco general del proyecto EUREKA "Fabrik der Zukunft" (la fábrica del futuro), Alcatel SEL asociada a otras firmas industriales y universidades está elaborando un sistema de planificación generativa de procesos para la fabricación de piezas[5]. El concepto básico subraya la necesidad de que el sistema sea práctico a la hora de utilizarlo, y susceptible de cambio o ampliación para incorporar nuevas herramientas y tecnologías. Debe ser igualmente capaz de crecer y ser flexible respecto al contenido de la base de conocimientos y otras bases de datos utilizadas, y respecto al grado de intervención humana en el proceso de toma de decisiones. Por último, aunque no con menor importancia, tiene que ser adecuado para integrarse en un entorno CIM ya existente.

Concepto de realización

En la figura 3 se muestran los interfaces y funciones generales del sistema de planificación del proceso. Hay dos actividades principales: reconocimiento de la forma de la pieza a fabricar, y generación de un plan que defina cómo puede fabricarse. Para identificar lo que se va a fabricar, el sistema analiza el diagrama CAD en 3D y traduce, utilizando técnicas de concordancia de patrones, los datos CAD en "peculiaridades de fabricación" tales como orificios, ranuras y cavidades. No existe definición formal de tales peculiaridades, pudiendo considerarse como estructuras de caras, bordes, etc. determinativas de la fabricación. En este contexto, las peculiaridades se definen como conjuntos de caras que cumplen ciertas relaciones geométricas, y se identificarán buscando conjuntos de caras que concuerden con el patrón de la peculiaridad (por ejemplo, una cavidad sería el conjunto de un fondo y cuatro paredes laterales).

Al decidir cómo fabricar una pieza, hay que examinar las relaciones entre las peculiaridades y las operaciones. Los orificios, por ejemplo, se pueden hacer por taladrado, escariado o perforado, pero normalmente no por fresado. Además, hay que considerar que las peculiaridades guardan una estrecha relación entre sí, lo que influye en la secuencia del proceso. Al determinar las operaciones más adecuadas y su secuencia, así como la configuración y colocación de los dispositivos de fijación, se deben tener en cuenta las herramientas, relaciones y cualesquiera restricción tecnológica o geométrica. Este proceso, denominado selección de tecnología, es la parte más compleja y exige poseer un amplio espectro

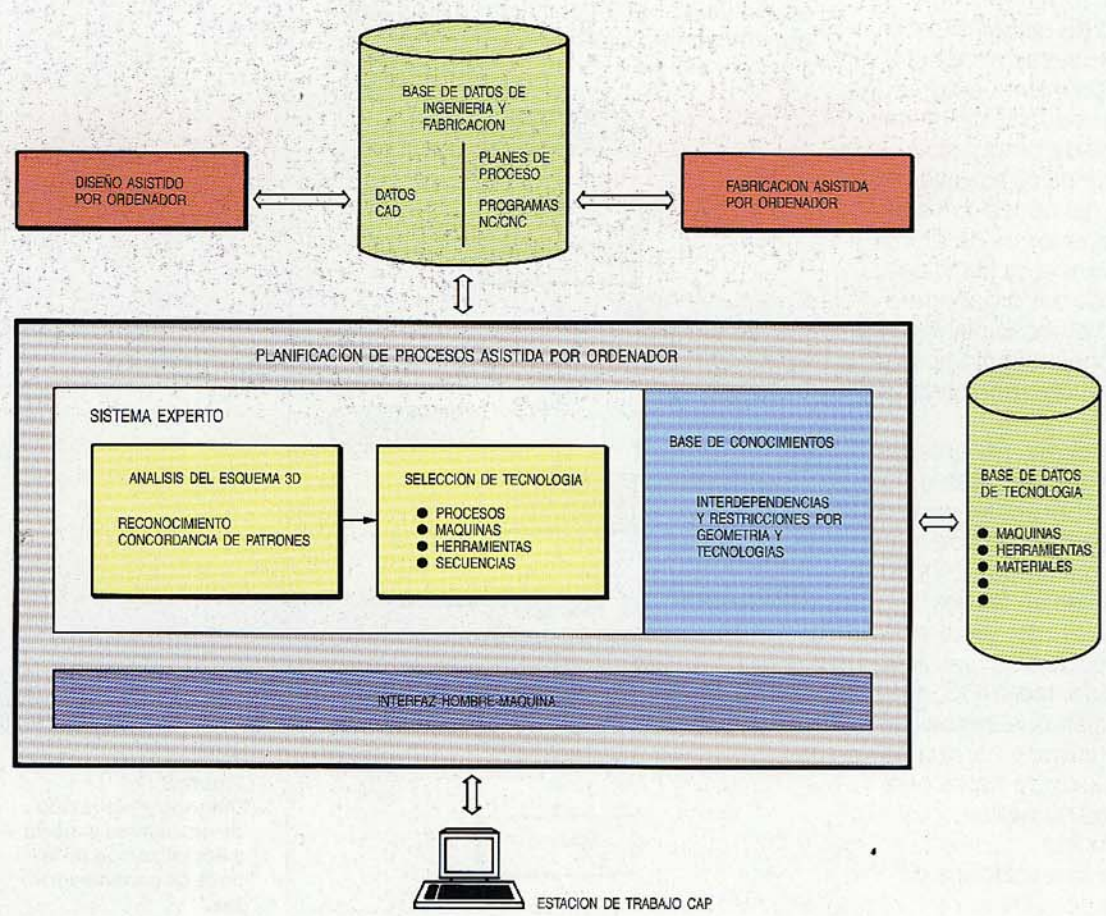
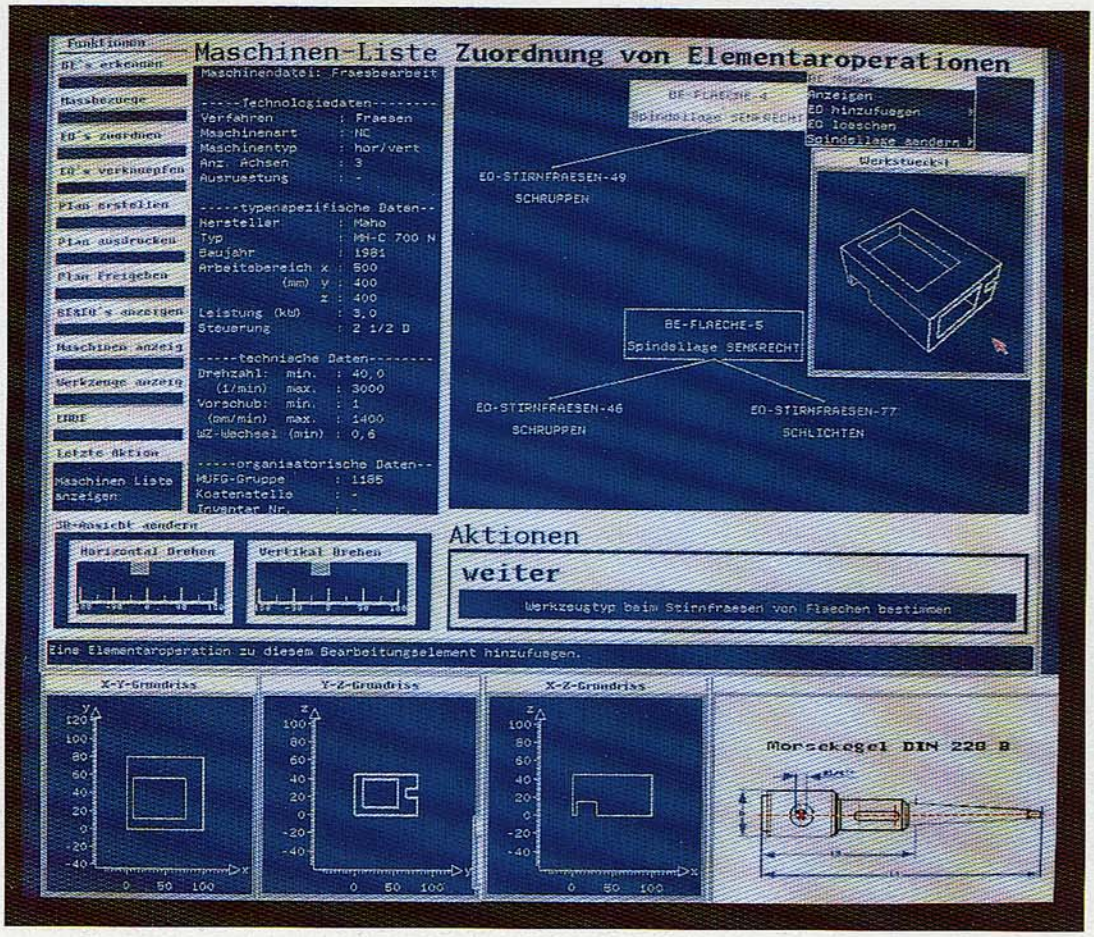


Figura 3
Planificación generativa de procesos con el soporte de una estación de trabajo CAP.

NC/CNC – control numérico/control numérico por ordenador.



Interfaz gráfico hombre-máquina para un sistema de planificación generativa de procesos.

de conocimientos. En consecuencia, es ventajoso el utilizar un sistema basado en el conocimiento.

Una base de datos convencional almacena informaciones tales como catálogos de dispositivos de fijación, herramientas y tablas de parámetros de corte para máquinas. Por el contrario, el conocimiento sobre las restricciones en el uso de ciertas herramientas, máquinas y sus interdependencias, se da principalmente en forma de reglas. Un *mecanismo de satisfacción de restricciones* (método para encontrar la "mejor" solución entre varias alternativas) utiliza el conocimiento disponible para generar un plan de proceso que sea a la vez viable y económico.

Estado del proyecto

Se ha realizado un primer prototipo en un entorno comercial de ingeniería del conocimiento, utilizando el lenguaje común de programación Lisp que se ejecuta en una estación de trabajo. Este prototipo abarca un número limitado de piezas, y genera planes de proceso para piezas con cavidades y ranuras, que son las más complicadas, de cualquier tamaño y en cualquier posición. Es capaz de explicar sus decisiones y de contestar a las preguntas del usuario. El análisis del prototipo ha dado ya resultados alentadores.

SONIA: un sistema para programación de tareas en fábrica

La programación de tareas es simplemente la asignación de recursos y de tiempos de comienzo y fin a las operaciones. Sin embargo, un análisis del problema de la planificación indica que el punto crucial consiste en definir y satisfacer la amplia gama de restricciones implicadas.

Por una parte, las decisiones de planificación deben satisfacer restricciones puras[6] tales como fechas de salida, duración y secuencia de las operaciones, y capacidad, disponibilidad y compartición de los recursos. Por otro lado, las restricciones prioritarias que caracterizan la calidad de las referidas decisiones, se refieren a fechas de vencimiento, frecuencia de cambio de las herramientas, y existencias, conduciendo a relaciones de prioridad entre los pedidos de fabricación, los procesos alternativos de producción, las operaciones de fabricación y los recursos alternativos. En consecuencia, la programación implica también decidir qué prioridades deben ser satisfechas, y en qué grado se puede relegar el resto.

En el contexto de la fabricación se pueden distinguir dos bloques constitutivos principales[7]. La *planificación predictiva* es la generación de un plan a ejecutar en el futuro. Por ejemplo, dado el estado del taller, merece la pena planificar pedidos de fabricación para tener en cuenta posibles retardos o conflicto de recursos. Sin embargo, los planificadores tienen que hacer frente a las dinámicas de producción resultantes de la incertidumbre inherente al taller: máquinas averiadas y llegada de nuevos pedidos de fabricación. Esta *planificación en tiempo real* implica el análisis de las desviaciones provocadas por sucesos no previstos, y la revisión del plan para ajustarse a las nuevas circunstancias.

Laboratoires de Marcoussis ha desarrollado el sistema de programación de tareas en fábrica, denominado SONIA, ideado para integrar las funciones de programación, distribución de pedidos y supervisión.

Planificación y programación a corto plazo

Un sistema de planificación y control de fabricación a corto plazo, tal como el SONIA, posee un cierto número de funciones:

- selección de pedidos y planificación de la capacidad
- asignación de recursos
- programación (en tiempo) detallada
- control en tiempo real de las perturbaciones y replanificación
- pruebas de fallo del plan utilizando la simulación.

Sección y planificación de la capacidad
El SONIA asigna prioridades a las actividades de acuerdo con los criterios de cronología, y selecciona las operaciones de forma que únicamente se fabrique lo realmente necesario. A menudo existen interacciones entre las actividades a programar, que el sistema deberá identificar y tratar de la forma apropiada. Las vías a seguir por el proceso y las necesidades de material son entradas necesarias, así como también la capacidad disponible y los datos que describen el estado del taller.

Se necesita conocimiento para seleccionar las actividades de fabricación más relevantes, que dependerán de la demanda del cliente, de las previsiones y de la estrategia interna de gestión de la producción.

Asignación de recursos
Se deben asignar recursos a las actividades seleccionadas. Para establecer una asignación definitiva de recursos a un conjunto de actividades hay que estimar las restricciones de la capacidad, y precaverse de cualesquiera conflictos potenciales que puedan afectar a dicha capacidad. El conocimiento es útil para identificar recursos críticos, reasignar actividades a recursos alternativos y redefinir los calendarios de máquina de forma que se utilicen al máximo los recursos costosos.

Programación detallada
Esta función se ocupa de definir en detalle la secuencia de las operaciones seleccionadas, especificando los tiempos de principio y fin de cada operación. El planificador debe ajustarse a numerosas condiciones de tiempo y de recursos, realizando una tarea sujeta a restricciones. Estas decisiones de secuencia predictivas exigen conocimiento; por ejemplo, para determinar el orden en que deben realizarse dos operaciones que necesitan la misma máquina, el SONIA ha de averiguar:

- si una de las operaciones es más urgente que la otra, y en qué grado
- si se requieren cambios de herramienta en cada una de las órdenes posibles
- de qué modo ambas decisiones posibles podrían reducir cualquier tiempo inactivo en las operaciones
- cómo se pueden satisfacer estos tres criterios (urgencia, cambios de herramienta, tiempos de inactividad) si es necesario llegar a un compromiso.

Control en tiempo real de las perturbaciones y replanificación
Diversas funciones confieren posibilidades de reacción al sistema de planificación. Una *función de detección de conflictos* compara las restricciones estimadas con las reales que existen en la fábrica. Las consecuencias de un conflicto entre restricciones que no pueden atenderse a la vez pueden circunscribirse a una vía de proceso o área de trabajo particular, o bien extenderse al programa global del proceso por haber cambiado los objetivos de producción. Este análisis constituye una entrada esencial para determinar cómo debe revisarse dicho programa. Una *función de replanificación* selecciona una estrategia reactiva adecuada y genera un nuevo plan.

SONIA utiliza el conocimiento para determinar:

- si algunos conflictos deben ser considerados antes que otros
- si alguna de las estrategias reactivas disponibles es la más adecuada para resolver los conflictos

– si alguno de los métodos reactivos será más rápido que los demás.

Pruebas de fallo del plan mediante simulación

Al SONIA se le ha incorporado un simulador para comprobar la bondad de la reacción de un plan ante sucesos inesperados tales como retrasos, interrupciones en las operaciones y averías de máquinas. Este simulador se ha diseñado utilizando un modelo de ejecución en red de Petri temporal, y emplea reglas de distribución para seleccionar las siguientes actividades a ejecutar. Las situaciones de simulación se evalúan en base a los criterios de programación pertinentes, que incluyen el número de actividades retrasadas y la carga de los recursos críticos. Los resultados ayudan a mejorar la efectividad de los planes antes de su introducción en la planta.

Panorámica del SONIA

El SONIA se ha construido utilizando un modelo arquitectónico de "pizarra", el cual amplía considerablemente la estructura clásica de los sistemas expertos. Por diversas razones se consideró que este modelo era particularmente adecuado para representar y efectuar la actividad de control en el SONIA. El modelo consta de una base de datos global (la *pizarra*) y de *fuentes de conocimiento* lógicamente independientes. Sólo a estas fuentes les está permitido realizar cambios en la pizarra. Tomando dichos cambios de información como base, un módulo de control selecciona y ejecuta la fuente de conocimiento siguiente (Fig. 4)[8].

El SONIA integra fuentes de conocimiento tanto predictivas como reactivas. Los componentes del análisis se pueden utilizar para evaluar contextos de solución de problemas predictivos y reactivos. En la actualidad, el SONIA incorpora un analizador de capacidad y un analizador de conflictos. El conjunto de heurísticos a utilizar en una fuente de conocimiento predictiva o reactiva se puede establecer de acuerdo con los resultados del análisis.

En la figura 5 se muestran las fuentes de conocimiento para el SONIA.

Estado y perspectivas

Los componentes reactivos y la arquitectura global del SONIA han sido probados con la ayuda del simulador, y las aplicaciones industriales se están ahora materializando. Un centro de pruebas aeronáuticas avanzadas proyecta utilizar el SONIA como sistema de coordinación de fábrica, tomando la salida de su sistema MRP2 y gestionando en tiempo real el sistema de fabricación.

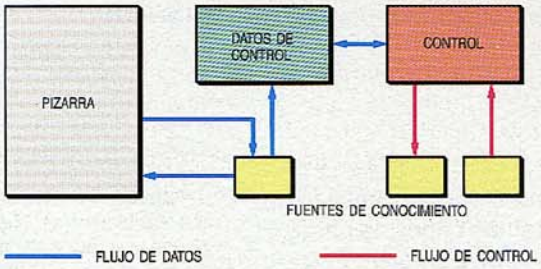


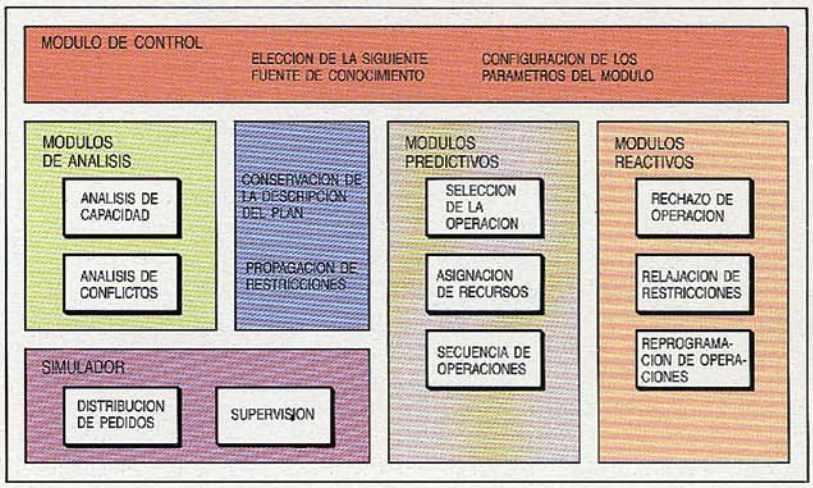
Figura 4 Representación esquemática del modelo arquitectónico de pizarra.

Sin embargo, el estado actual de la tecnología pone de relieve tres áreas importantes que necesitan más comprensión y un nuevo desarrollo para mejorar su adecuación a las aplicaciones industriales en tiempo real. La primera es la gestión de la producción operacional que habrá de ampliarse desde el nivel de célula de trabajo al de sistema de control que abarque toda la fábrica. Las fábricas del futuro pueden muy bien estar constituidas por una serie de células de trabajo basadas en productos, y se considera necesario que cada una de estas células tenga su propio sistema de programación en tiempo, sometido a un controlador de nivel superior que se extienda a toda la fábrica y coordine las actividades de todas las células de fabricación.

Una segunda área consiste en integrar las actividades de coordinación de la fábrica con la programación maestra de la producción. La tercera responde a la necesidad de una arquitectura distribuida del soporte lógico para facilitar la integración del conocimiento experto en una extensa gama de disciplinas a los niveles táctico y operacional de gestión de la producción.

Laboratoires de Marcoussis está desarrollando estos temas en colaboración con Alcatel AMTC, Alcatel TITN y entidades asociadas al proyecto IMPACS de Esprit 2

Figura 5 Arquitectura del SONIA.



sobre *sistemas de planificación y control de fabricación integrada.*

Conclusiones

El DIAESS ha demostrado ser muy eficaz en el desarrollo de sistemas expertos para la diagnosis de averías, y en particular para la diagnosis de placas de circuito impreso complejas. El uso actual de sistemas expertos para la diagnosis de tales placas depende de la eficacia de los equipos de prueba y de diagnóstico disponibles, así como del grado de intervención humana en el proceso diagnóstico.

La integración en un entorno CIM existente fue un requisito esencial en la planificación y concepción de un sistema para planificación generativa de procesos. Se ha desarrollado un prototipo utilizando tecnologías disponibles de dotación física y lógica, obteniendo resultados prometedores en el complejo campo de la planificación de procesos.

El proyecto SONIA, que proporciona un marco integrado en soporte de aplicaciones de planificación industrial, representa un importante esfuerzo de investigación hacia un sistema inteligente de control y planificación de tareas. Utilizando la tecnología de sistemas expertos para capturar el conocimiento y experiencia de los ingenieros de fabricación, el SONIA ofrece una definición realista del problema de la planificación y un análisis del contexto dinámico de la planta para auxiliar a los directores de producción a elaborar planes y tomar decisiones reactivas.

La lograda introducción de tales sistemas requiere una infraestructura definida y el apoyo total de la plantilla directiva, así como la aceptación de los expertos y de los usuarios, cuyo temprano adiestramiento y participación en el proyecto, junto con un interfaz hombre-máquina adecuado, han contribuido enormemente a su éxito.

Referencias

1 R. Gunhold y J. Zettel: Pruebas en fábrica del Sistema 12: *Comunicaciones Eléctricas*, 1986, volumen 60, n° 2, págs. 128–134.
2 W. Frank: Einsatz von Expertensystemen im Testbereich: *Proceedings of 3rd International Exhibition and User Conference, CAT 87*, 1987, págs. 153–156.
3 U. Rembold y R. Dillmann: Computer-Aided Design and Manufacturing, Methods and Tools: *2nd Edition, Springer Verlag*, pág. 120.
4 Y. Descotte y J.-C. Latombe: GARI: A Problem Solver that Plans how to Machine Mechanical Parts: *Proceedings of the Seventh International Joint Conference on Artificial Intelligence*, 1981, págs. 766–772.
5 H.-J. Nenz: Wissensbasierte Arbeitsplanung: Technologie-Zentrum Nord Congress on Expert Systems, 13–15 marzo 1988, Bremen.
6 C. Lepape y B. Sauve: SOJA: Un Système d'Ordonnancement Journalier d'Atelier: *International Workshop on Expert Systems and their Applications*, Avignon, Francia, mayo 1985.
7 B. Sauve: Job Shop Dynamic Scheduling; the Knowledge Based Approach of SONIA: *IFIP Working Conference on Knowledge Based Production Management Systems*, Galway, Irlanda, agosto 1988.
8 R.S. Englemore, A.J. Morgan y H.P. Nii: Introduction to Blackboard Systems: R. Englemore y A.J. Morgan (editores), *Addison-Wesley Publishing Company*, 1988.

Willi Frank nació en Alemania en 1945. Se graduó en ingeniería eléctrica, y en 1973 obtuvo el título de diplomado en telecomunicaciones en la Universidad Técnica de Darmstadt. Ingresó entonces en SEL como ingeniero de desarrollo, siendo luego nombrado jefe del grupo de diseño de equipo físico de centrales digitales, responsable de la red digital de conmutación del Sistema 12 y el diseño de circuitos VLSI. En 1984, el Sr. Frank se hizo cargo de un departamento para el desarrollo de programas de prueba. Desde 1987 ha sido director de desarrollo de soporte lógico en ingeniería industrial con especial responsabilidad en la realización de proyectos CIM.

Bernard Sauve nació en 1960. Fue jefe de proyecto en Laboratoires de Marcoussis desde 1983 a 1988, dirigiendo los proyectos que dieron lugar a los sistemas SOJA y SONIA de planificación de fábricas, así como el sistema MISSION 2 de planificación y replanificación de misión a bordo del Columbus. El Sr. Sauve es en la actualidad asesor principal en inteligencia artificial dentro de la división de industria y defensa de Alcatel TITN, donde está dedicado a la aplicación de sistemas expertos en la industria manufacturera. Sus intereses se dirigen hacia el razonamiento temporal, la planificación dirigida por restricciones, arquitecturas de control, y el uso del conocimiento para potenciar los sistemas inteligentes.

Fabricación electrónica de las centrales de conmutación digital Sistema 12 y Alcatel E10

La tecnología de fabricación requerida para producir sistemas de conmutación electrónica digital es algo más que fabricar placas de circuito impreso, cables y bastidores. Tiene particular importancia el tiempo total que transcurre desde el pedido hasta la entrega de la central enteramente probada, incluyendo el soporte lógico del sistema. Para garantizar la calidad *total* de este tipo de producto se requiere un soporte de amplio espectro que abarque la planificación de necesidades de materiales, la generación de datos de fabricación y la recopilación de datos sobre calidad.

Y. Derrien
Alcatel CIT, Eu, Francia
A. Fraile
Alcatel Standard Eléctrica, Madrid, España
W. Hartl
Alcatel SEL, Gunzenhausen, República Federal de Alemania
J. Ijsseldijk
Alcatel Bell Telephone, Geel, Bélgica

Introducción

Todas las compañías fabricantes de sistemas de conmutación digital se enfrentan hoy al desafío de acortar los plazos de entrega, reducir los costes de producción y asegurar que la calidad se ajusta a lo especificado. Es de especial importancia la fase de diseño de un producto para que éste se preste bien a la fabricación y a las pruebas. En concreto, el sistema debería tener arquitectura modular, con poco más de 30 tipos de PBA (*printed board assembly*, placa de circuito impreso) diferentes para cada versión específica de un país. Asimismo debería tener una práctica de equipos estándar, con PBA de tamaño único y distribución tal que permita el ensamble y la prueba por medios automáticos, fijando rigurosos límites al número de tipos de componentes distintos utilizados.

Ambas centrales de conmutación digital, Sistema 12 y Alcatel E10, cumplen estos requisitos, que pueden considerarse como el punto de partida para una producción eficaz.

Las plantas de fabricación electrónica modernas están equipadas con numerosas herramientas para soporte de la producción, figurando entre ellas sistemas de planificación y control de la fabricación[1], herramientas para generación automática de datos de control de fabricación y pruebas, sistemas de fabricación flexible[2], sistemas expertos para aplicaciones de fabricación y pruebas[3] y sistemas de control de la calidad.

Ciclo de fabricación

En centrales de 4000 líneas se pueden conseguir tiempos de fabricación de tres semanas – desde que los componentes salen de almacén hasta que la central completa está lista para envío a la instalación – adoptando algunas medidas importantes:

- Reducción de los tiempos de preparación de procesos, principalmente conectando las máquinas de ensamble automático, vía una red de área local, a un ordenador central de modo que puedan cargarse en dichas máquinas los programas requeridos para su operación, y también mejorando la calidad de los preprocesadores* de las citadas máquinas de ensamble.
- Colocación de almacenes de materiales en las propias líneas de ensamble, con objeto de eliminar el tiempo invertido en llevar los materiales desde un almacén central al lugar donde se necesitan.

* Programas que convierten un formato de datos en otro distinto que puede ser tratado con más rapidez por la máquina objeto.

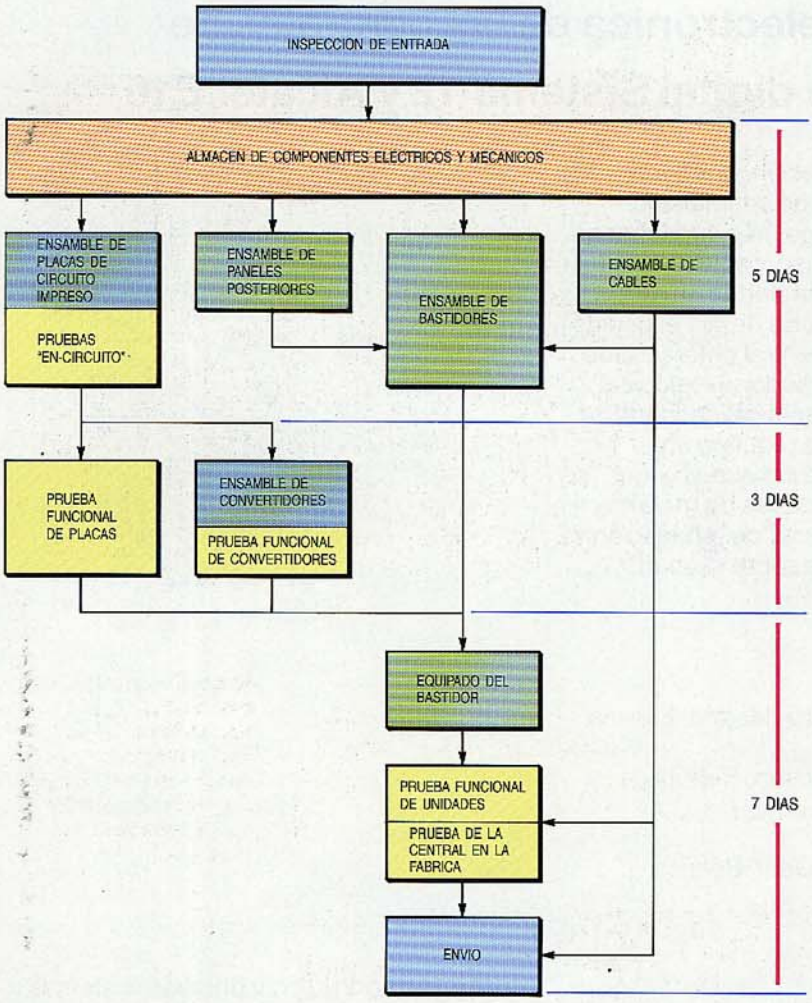


Figura 1
Diagrama ilustrativo del proceso total de producción para una central digital Sistema 12.

- Edición diaria de pedidos de trabajo para las lineas de ensamble, a fin de mejorar el control del trabajo en curso.
- Introducción de sistemas de ensamble automático, como robots para fabricación de PBA.
- Uso de equipos universales de prueba con tiempos de preparación cortos.
- Implantación de métodos de control de procesos para mejorar la capacidad de tales procesos – aptitud del proceso para producir tantas unidades como sea posible con la calidad requerida –, reduciendo por ejemplo tiempos muertos.

La figura 1 ilustra el proceso de producción entero. El tiempo de fabricación indicado incluye todos los bastidores, las PBA y convertidores CC/CC requeridos para una central de 4 000 líneas.

Ensamble y prueba de placas de circuito impreso

Las PBA están en el corazón de un sistema de conmutación digital moderno, y por ello son de la máxima importancia unos procesos de fabricación y prueba eficaces.

Por consiguiente, el ensamble de las PBA es una parte muy destacada de la producción de un sistema digital. Existen en el mercado gran variedad de equipos de fabricación, por lo que sólo en algunos casos es necesario utilizar maquinaria de producción especial diseñada "en la casa". El verdadero reto para la ingeniería industrial es seleccionar el equipo más adecuado y explotarlo del modo más económico – con adiestramiento efectivo de los operarios, tiempos de preparación cortos y mantenimiento eficaz –, así como implantar procedimientos y equipos de tratamiento óptimos que mantengan la fluidez de los materiales a lo largo de la línea de producción y garanticen un buen rendimiento general. Además, deberían utilizar generación automática de datos para procesos y tratamiento a partir de la información básica de ingeniería, como la existente en un entorno de fabricación integrado por ordenador.

El ensamble de los dispositivos de montaje superficial (SMD) es la tecnología de fabricación de aparición más reciente; con ella se ocupa menos espacio en la placa y se consigue una reducción notable en el número de placas de una central. Para el montaje de estos componentes avanzados pueden utilizarse equipos manuales, semiautomáticos o automáticos dependiendo de los volúmenes de producción[4].

El ensamble por robot se utiliza para posicionar componentes que no se pueden manipular con máquinas estándar de alta velocidad; se reserva para placas producidas en gran cantidad que contienen gran número de tales componentes. Las máquinas automáticas para la inserción de componentes con terminales en doble fila o axiales llevan en uso más de 10 años, y todavía hoy manejan alrededor del 70% de todos los componentes utilizados en una central, pero esta proporción decrecerá a medida que se utilice más la tecnología SMD.

Aunque el ensamble automático sea el proceso preferido, siempre habrá algunos trabajos de ensamble que resulten más económicos siguiendo métodos manuales, con guía por haz luminoso o asistencia por pantalla y con un suministro de componentes sincronizado a cada posición. Antes del ensamble manual, los componentes con terminales preformados se colocan en el orden físico adecuado para el ensamble (formación de conjuntos de componentes).

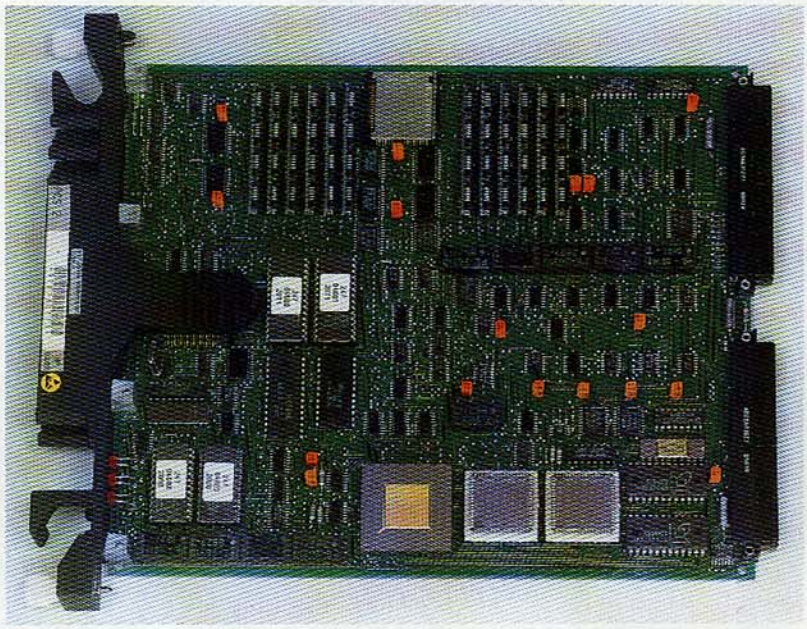
En placas producidas en pequeña cantidad se utiliza ensamble asistido por pantalla visualizadora. Todos los datos requeridos para asegurar la precisión del ensamble se presentan uno tras otro en una pantalla gráfica de ordenador, que automáticamente

refleja el estado del producto. Esta técnica garantiza un ensamble prácticamente exento de fallos.

La prueba es otro elemento clave para asegurar el funcionamiento óptimo de las placas de la central de conmutación digital.

Otras recomendaciones para la ingeniería industrial son las siguientes:

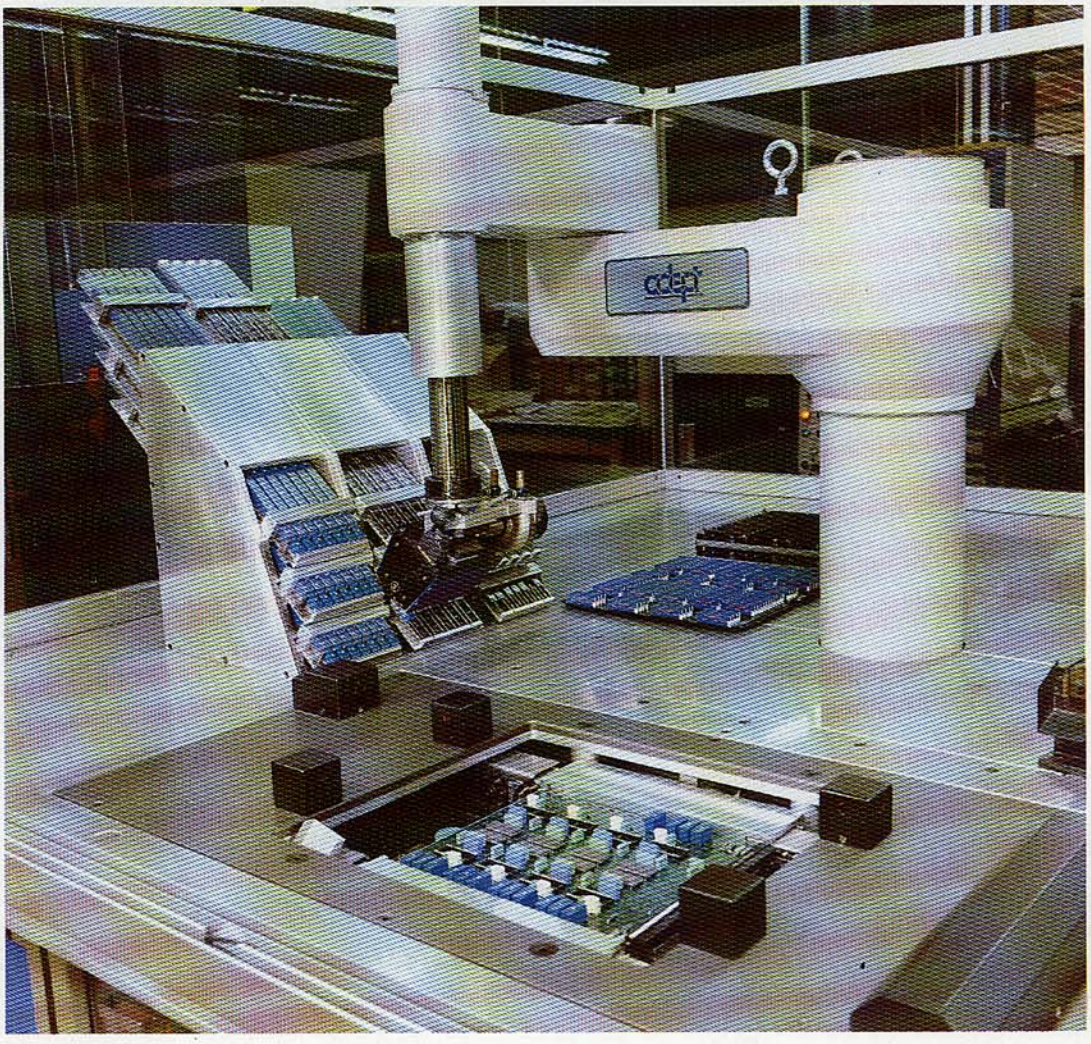
- generación automática de los programas de prueba
- adaptación de los métodos para hacer que los tiempos de prueba sean mínimos
- optimización de la diagnosis de fallos por medio de sistemas basados en el conocimiento
- recogida directa de datos de fallos, bien automáticamente por el equipo de pruebas o bien por introducción manual del operario; una vez procesada, esta información aporta datos sobre calidad que deben pasar rápidamente a las líneas de ensamble.



Placa controladora del módulo MCTRA, equipada con circuitos VLSI a medida, memorias de uno y cuatro megaoctetos, SMD y componentes convencionales.

La prueba "en-circuito" * a menudo es la primera etapa para localizar defectos de producción tales como omisión de componentes, valores erróneos de los mismos,

* Prueba de los componentes ensamblados en una placa, en la que se miden los parámetros básicos de cada componente.



Sistema de ensamble por robot utilizado en la producción de placas para equipo de conmutación digital.

polaridades incorrectas y pistas abiertas o en cortocircuito. Su ventaja es una gran eficacia en la prueba y el diagnóstico. La generación de programas de prueba está en buena medida automatizada utilizando equipos de prueba "en-circuito" existentes en el mercado.

La prueba funcional de placas se divide en tres categorías principales. Las placas de procesador, memoria, interfaz terminal y unidad de conmutación se prueban a temperaturas de 18 a 45 °C en un equipo reservado a tal fin. Las de líneas y enlaces se prueban en un equipo desarrollado al efecto, utilizando técnicas de proceso digital de señal. El resto de las placas se prueban dentro de los respectivos módulos funcionales (conjuntos de PBA conectadas por un panel posterior).

Prueba de líneas y enlaces.

Ensamble y prueba de convertidores CC/CC

Los convertidores CC/CC para centrales de comutación digital tienen un diseño modular que reduce al mínimo la variedad de tipos de componentes necesarios. Ello es una ventaja importante para el control de producción, fabricación y pruebas.

El ensamble se hace en varias etapas. Primero se fabrican las placas y se prueban en-circuito antes de pasarlas a la línea de ensamble de convertidores CC/CC. En paralelo, se ensamblan submódulos como el disipador y los cables de alimentación. El siguiente paso es integrar estos elementos en un convertidor CC/CC completo mediante técnicas de ensamble manual.

Una vez ensamblado, el convertidor debe someterse a una prueba de aislamiento en alta tensión y después a una prueba funcional para comprobar sus prestaciones. El equipo automático de prueba para los convertidores es un comprobador de potencia universal. Como los distintos convertidores utilizan un mismo conector mecánico, sólo se necesita un tipo de adaptador de prueba, con la gran ventaja de poder probar diferentes tipos de convertidores sin más que cargar el programa de prueba apropiado.

La línea integrada de ensamble y prueba de convertidores CC/CC se basa en principios FMS (sistemas de fabricación flexible) y está controlada por un sistema de ordenador con tres niveles jerárquicos. El material llega a la línea en contenedores, que llevan todo el material necesario para ensamblar de uno a cinco convertidores, de acuerdo con el pedido de trabajo. La programación del sistema y el concepto logístico permiten el paso inmediato de un tipo de convertidor a otro.

Producción de bastidores

Cada bastidor se compone de varios cuadros que contienen un determinado número de paneles posteriores de circuito impreso y de alambrado, interconectados mediante cables de hilos, de señal y de potencia. El bastidor proporciona pues alojamiento e interconexión a las distintas placas de circuito impreso. A continuación se destacan algunas etapas del proceso de ensamble.

Línea de ensamble y prueba integrada para la producción de convertidores CC/CC.

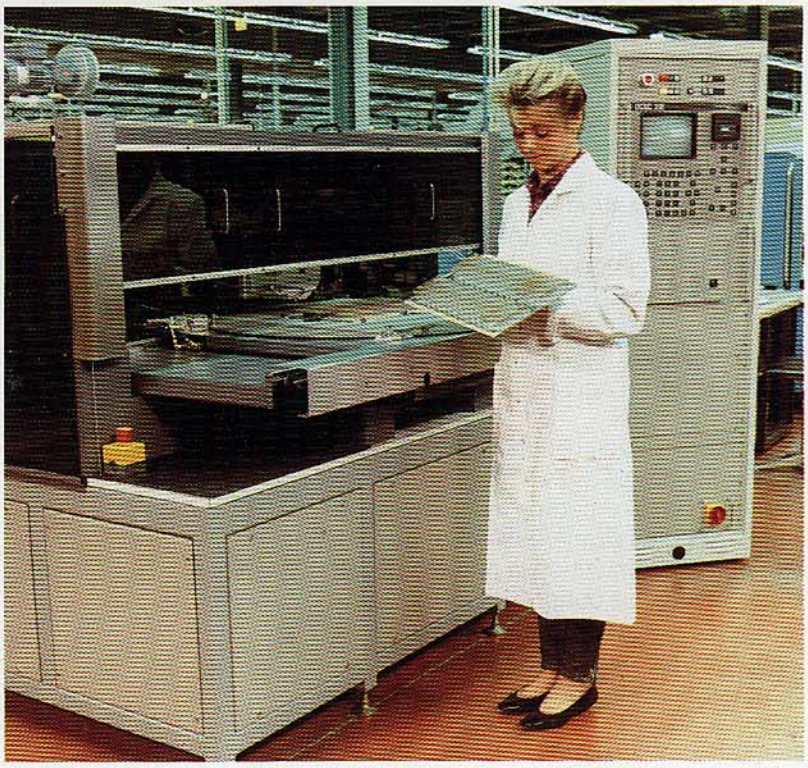
Paneles posteriores de circuito impreso
Los paneles posteriores están equipados con terminales de contacto que forman el conector macho de un sistema de interconexión. Dependiendo del diseño del producto y de cuál sea su función, estos terminales se insertarán en los taladros metalizados de la placa utilizando una máquina de inserción automática y selectiva o bien como unidad completa mediante una prensa específica de inserción de terminales.

La máquina de inserción selectiva trabaja a una velocidad de 4,5 terminales por segundo y con flexibilidad para programar el tipo de terminal, la posición y la profundidad de inserción de cada uno de ellos. Las principales ventajas que aporta la inserción selectiva son:

- los terminales se insertan únicamente en los taladros metalizados que necesitan contacto
- en una misma fila de conectores pueden incluirse terminales con diferente tipo de acabado; el Sistema 12 utiliza terminales de diversos tipos
- contactos escalonados en el orden de cierre-apertura: la profundidad de inserción está programada para cada posición de contacto, eliminando la necesidad de ajustes mecánicos.

La última característica es importante cuando algunos contactos han de hacer conexión antes o después que los demás, lo que se consigue ajustando la altura de los contactos de terminales.

Máquina de inserción de terminales por ajuste a presión, utilizada para los contactos de los paneles posteriores de circuito impreso.



Ensamble de cables
Los paneles posteriores están interconectados principalmente por cables provistos de conectores apropiados. Las conexiones con los hilos interiores de los cables se efectúan con la técnica IDC (insulation displacement technique)*. Los hilos se insertan en las ranuras IDC mediante una herramienta programable especial de engastar terminales de cable, que opera con diferentes conectores y tamaños de hilo.

* Técnica de desplazamiento de la capa aislante: el terminal tiene una ranura en V en la que puede encajarse el conductor con el aislante. Para que el contacto sea fiable, el tamaño y forma de la ranura deben ir de acuerdo con el del hilo conductor. Los bordes de la ranura atraviesan el aislante formando contacto metálico entre terminal y conductor.

Pruebas de alambrado e interconexión
Tras completar el ensamble del bastidor, se utiliza un comprobador automático de alambrado para localizar accidentales aperturas de circuito y cortocircuitos en la red de interconexión del bastidor. El sistema es gobernado por ordenador y el programa de pruebas utilizado para probar cada producto se obtiene a partir de la base de datos de ingeniería.

Prueba funcional de bastidor/central

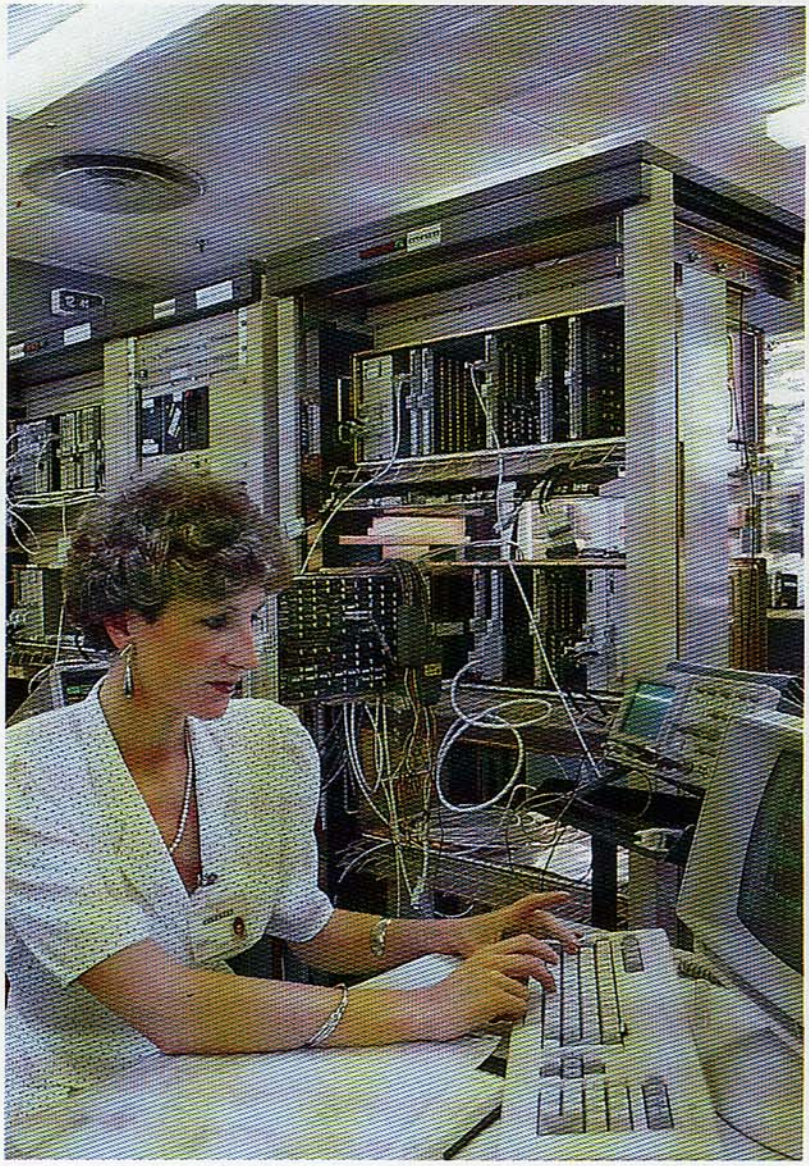
Después de instalar las PBA y convertidores CC/CC en los bastidores, hay dos técnicas o métodos utilizables para la prueba funcional de bastidores y centrales, dependiendo de lo que necesite el usuario.

En el primer método, los bastidores individuales pasan por una prueba funcional completa utilizando las placas microprocesadoras que controlan los diversos módulos del sistema, con lo que se aprovecha al máximo la potencia de proceso disponible en el bastidor. Todas estas funciones tienen que haber sido probadas totalmente al nivel de PBA. Los bastidores pueden probarse uno a uno o bien conectarse a una estación capaz de probar varios bastidores en paralelo. Todos los elementos de control de todas las unidades funcionales del bastidor se cargan con una programación específica y autónoma a través de la red de conmutación de la central. Tras la carga, la prueba continúa automáticamente sin intervención del operador. Los datos de fallo son recogidos y enviados a un ordenador personal o teleimpresor. El proceso lo controla un programa denominado monitor.

El segundo método se utiliza para probar centrales completas en la fábrica, cableando la central de acuerdo con la distribución final en planta de la misma y cargando la cinta de sistema propia de esa configuración concreta. Con el programa de mantenimiento y diagnóstico que se ha de entregar al usuario se realiza una completa comprobación de todo el equipo físico y soporte lógico de la central. Se reduce así el plazo de entrega total, con instalación incluida, ya que los errores se corrigen más aprisa antes de instalar el sistema.

Sistema de control de calidad/recogida de datos

En las plantas modernas de ensamble de placas, los sistemas de control de calidad recogen y analizan automáticamente datos de fallos que provienen de todas las etapas de prueba en la línea de producción, asociando los fallos a sus causas.



Prueba de la central.

Cada unidad en la línea de producción se identifica por un código de barras, lo que permite correlacionar con la unidad correspondiente todos los datos de prueba recogidos automáticamente. Desde cualquier estación de prueba es posible la consulta inmediata de la historia de fallos entera de cada unidad; ello permite prescindir de documentos sujetos a error en su asignación a unidades, y por tanto mejora la calidad. El soporte lógico se ejecuta sobre una red de área local.

Como facilidad adicional, hay un sistema de alarma que da a los supervisores de la planta, en fase temprana del proceso de fabricación, las siguientes informaciones: rendimiento mínimo de la primera pasada, número de fallos consecutivos, máximo tiempo de ejecución de una prueba y tiempo empleado en diagnóstico y reparación. Los límites permitidos para tales alarmas sólo pueden ser fijados por personal de ingeniería de calidad.

La base de datos que almacena todos los datos de pruebas se utiliza para compilar automáticamente informes sobre gestión de calidad[5] y suministrar datos para operar los programas de accionamiento de robots.

Conclusiones

Los conceptos de diseño adoptados para los sistemas de conmutación digital Sistema 12 y Alcatel E10 han contribuido decisivamente a asegurar que ambos productos podían ser fabricados de manera fiable y eficiente. Desde que se inició la fabricación del Alcatel E10 en 1980 y del Sistema 12 en 1983, se han producido millones de líneas en todo el mundo, utilizando casi las mismas herramientas de producción y los mismos procesos. Durante este tiempo, la evolución del diseño ha conducido a la introducción de una nueva e importante tecnología de fabricación: el montaje superficial. Todos los procesos de fabricación elegidos han permitido compatibilizar la evolución del diseño con cambios solamente de carácter menor en las fábricas.

Se ha dedicado el principal esfuerzo de fabricación al acortamiento del ciclo de fabricación, la reducción de inventarios y la mejora de la calidad total del producto.

Referencias

1 F. Bolay, A. Waldraff y A. White: Sistemas de planificación y control de la fabricación: *Comunicaciones Eléctricas*, 1989, volumen 63, n° 2, págs. 107–114 (en este número).

2 P. Hurault, H.R. Kopa y K. Kreft: Fabricación asistida por ordenador, sistemas de fabricación flexible, y simulación: *Comunicaciones Eléctricas*, 1989, volumen 63, n° 2, págs. 99–106 (en este número).

3 W. Frank y B. Sauve: Sistemas expertos para aplicaciones de fabricación y pruebas: *Comunicaciones Eléctricas*, 1989, volumen 63, n° 2, págs. 137–144 (en este número).

4 P. Meesemaecker, W. Rozumek y R. Tarrieu: Introducción a la tecnología de dispositivos de montaje superficial: *Comunicaciones Eléctricas*, 1989, volumen 63, n° 2, págs. 122–129 (en este número).

5 H. Lang y B. Lefebvre: Concepto de la calidad total: *Comunicaciones Eléctricas*, 1989, volumen 63, n° 2, págs. 183–186 (en este número).

Yves Derrien nació en Caen, Francia, en 1945. Estudió ingeniería electrónica y eléctrica en la Escuela de Ingeniería de París, donde se graduó en 1969. Dos años más tarde ingresó en Alcatel CIT donde fue responsable de la práctica de equipo del E10. Más tarde se hizo cargo de la plantilla de ingeniería industrial de París, antes de ser nombrado jefe de la planta de producción de Cherburgo en 1985. El Sr. Derrien es en la actualidad director de producción de las plantas de Alcatel CIT en Eu y Cherburgo.

Alfredo Fraile nació en Paymogo (Huelva), España, en 1943. Recibió el título de ingeniero de telecomunicación por la Universidad de Madrid en 1969. Ese mismo año ingresó en Standard Eléctrica para dedicarse a ingeniería de diseño en sistemas de transmisión. Después de trabajar en la Fábrica de Toledo en control de calidad e ingeniería de pruebas de fabricación, se incorporó a la fabricación del Sistema 12. En 1983 fue nombrado jefe de ingeniería industrial de fabricación del Sistema 12, y luego de transmisión y PABX, y posteriormente se trasladó al Advanced Manufacturing Technology Centre en Bruselas como director de proyectos de fabricación. Desde 1989 es jefe de ingeniería industrial en la fábrica del Sistema 12 de Alcatel Standard Eléctrica en Madrid.

Walter Hartl nació en Stuttgart, Alemania, en 1938. En 1960 se graduó en mecánica y tecnología de la producción en el Colegio de Ingeniería de Esslingen. Trabajó en diseño de equipos de navegación aérea y ofimática hasta su llegada a SEL en 1966, donde ocupó diferentes puestos en áreas operacionales y de staff en las divisiones de conmutación y transmisión y en ITT Europe. Desde 1980 participó en la línea de producción del Sistema 12, y desde 1984 es jefe de ingeniería industrial y fabricación de la planta de Gunzenhausen.

Jeroen Ijsseldijk nació en Apeldoorn, Holanda, en 1947. En 1972 se graduó en electrónica en la Universidad de Twente, Holanda, y en el mismo año ingresó en BTM (ahora Alcatel Bell Telephone) donde se dedicó al diseño de procesadores para el sistema Metaconta*. Después de dirigir el departamento de diseño de ordenadores para el Sistema 12, en 1983 pasó de la división técnica a la de operaciones. Actualmente el Sr. Ijsseldijk es responsable de la industrialización de productos de conmutación pública y transmisión y es también responsable de los procesos requeridos para la fabricación de estos productos.

* Marca registrada del Grupo Alcatel.

Fabricación de sistemas de comunicaciones de empresa

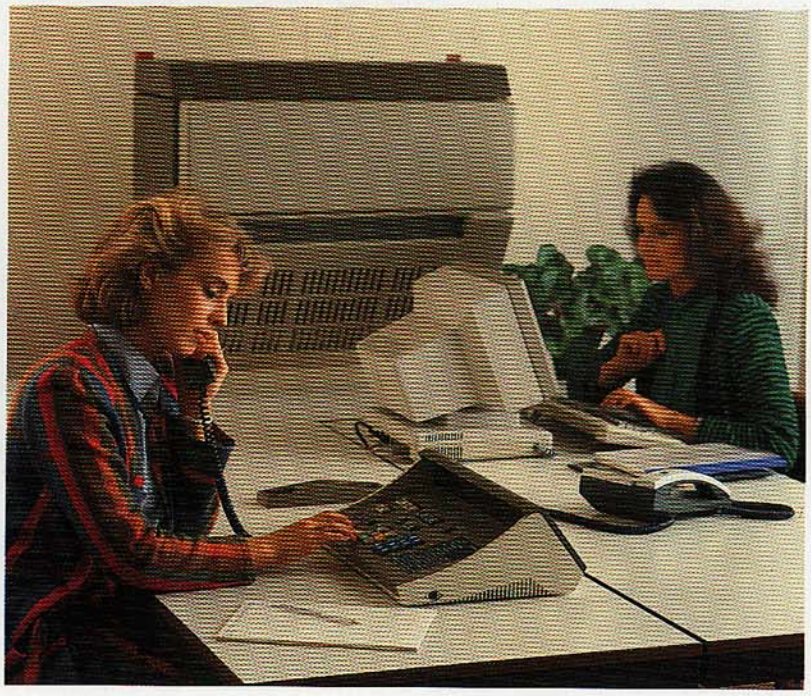
Las variables exigencias de los usuarios de sistemas de comunicaciones de empresa dan lugar a un número relativamente grande de tipos de placas a fabricar en pequeñas cantidades, planteando una serie de problemas específicos. Alcatel Austria ha implantado un sistema de fabricación flexible que satisface estos requisitos a un coste mínimo.

G. W. Hasler
Alcatel Austria, Viena, Austria

Introducción

La fabricación de sistemas de comunicaciones de empresa (BCS, *Business Communication System*) goza de una larga tradición en Alcatel Austria, iniciada con los sistemas electromecánicos y proseguida con las PABX semielectrónicas como Minimat* y electrónicas como Unimat*, hasta llegar al 5200 BCS digital. Recientemente se ha presentado una PABX electrónica digital avanzada, la 5200 BCN (*business communication network*, red de comunicaciones de empresa) que ofrece tecnología de 16 bits, comunicación de datos e interconexión en redes. Este sistema exigió introducir nuevas tecnologías en productos y en fabricación, incluyendo los SMD (componentes de montaje superficial).

Aspecto de la red digital de comunicaciones de empresa Alcatel 5200 BCN.



El Alcatel 5200 BCN está diseñado para aplicaciones de oficina y para utilizarse en arquitecturas de redes privadas. Puede transmitir voz, imagen y datos de un puesto de trabajo a otro, de un puesto de trabajo al ordenador, y de un ordenador a otro, ofreciendo todos los servicios actualmente posibles y aprobados por la Administración. Cuando se utiliza con la estructura de red privada se puede conectar a varias BCN locales para formar una red que cubra varias divisiones y centros de una organización. Esta amplia gama de aplicaciones es resultado de la concepción flexible y altas prestaciones del 5200 BCN.

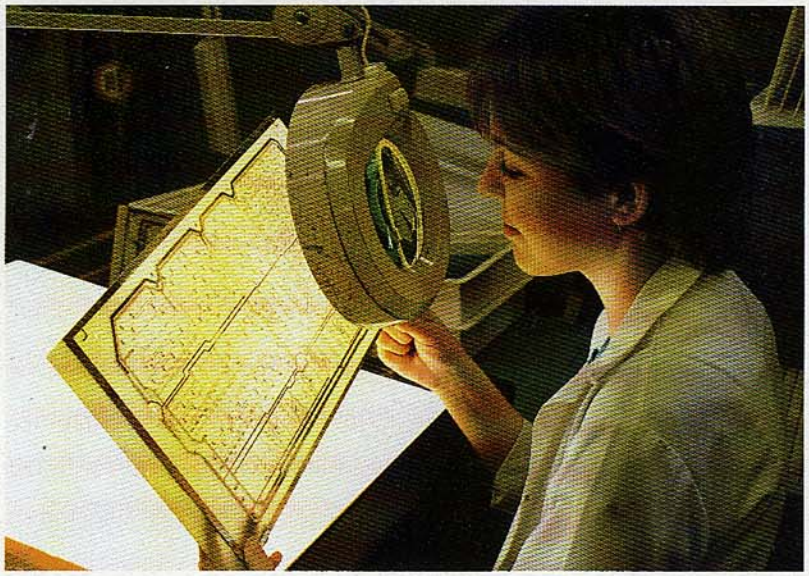
La práctica de equipo y el diseño de este sistema es modular, lo que permite formar versiones de diferentes tamaños. Los sistemas pequeños con capacidad máxima de 256 puertos están alojados en reducidos armarios murales, mientras que los sistemas grandes se montan en armarios normales. Por ejemplo, un sistema de 2048 puertos consta de cuatro armarios.

Utilizando 5200 BCN de diferentes tamaños se pueden construir redes con varios miles de usuarios. Además, es posible potenciar los 5200 BCS existentes de manera que se puedan integrar en la arquitectura de red privada del Alcatel 5200 BCN.

Objetivos de fabricación

Un sistema de comunicaciones de empresa nuevo tiene como principales objetivos de fabricación una producción rápida y flexibilidad para cumplir los diferentes requisitos de los mercados nacionales y de exportación. Es esencial que la planta pueda produ-

* Marca registrada del Grupo Alcatel.



Examen visual de una placa de circuito impreso para detectar fallos.

cir gran número de tipos de placas y distintas configuraciones de producto, a menudo para pequeñas series, y además se mantengan bajos los costes de fabricación. Otros objetivos importantes, comunes a todos los productos de telecomunicación, son unos bajos inventarios y una alta calidad estable.

En la etapa de diseño, alcanzar los objetivos implicaba adoptar una concepción modular y garantizar una estricta normalización en el diseño de componentes y de productos, teniendo en cuenta los requisitos de la fabricación y las pruebas. En el área de fabricación se requerían métodos avanzados, entre ellos la fabricación continua de placas de circuito impreso (PBA) independientemente de la cantidad a producir, con tiempos de preparación muy cortos o nulos al pasar de un tipo de placa a otro (flujo de material en "lote único"). Otros factores importantes que contribuyen al logro de los objetivos de fabricación son los cortos plazos de entrega de componentes, la automatización parcial y la operación informatizada.

Atención a la fabricación durante el desarrollo

Desde el comienzo del desarrollo de la 5200 BCS en 1984, los ingenieros de fabricación trabajaron codo a codo con los diseñadores de sistemas. Este trabajo en común se tradujo en numerosas "reglas de base" que condujeron a la introducción de nuevas normas de diseño y de fabricación.

Se examinaron todas las normas de fabricación y reglas para diseño de productos existentes, y se analizaron nuevos equipos de fabricación y de prueba con miras a que el producto resultara fácil de fabricar y probar. La tendencia a utilizar maquinaria de fabricación más automatizada (por ejemplo, para inserción de componentes) y equipo de pruebas también más automático afectó fuertemente al diseño y configuración del producto. Durante estas etapas iniciales se adquirieron conocimientos y experiencias que resultaron especialmente útiles a la hora de la partición del diseño.

Era esencial la modularidad del diseño, pues el 5200 BCS se dirigía al mercado internacional y la experiencia había enseñado que las especificaciones de centrales privadas varían notablemente de un país a otro. Además, la expansión de tales productos en todas las áreas de sistemas de comunicaciones de empresa requería una familia de productos modular.

Durante el desarrollo del sistema se introdujeron técnicas de diseño y fabricación asistidos por ordenador, pues desde el principio fue evidente que el método de producción tendría que encajar en un futuro entorno CIM (fabricación integrada por ordenador).

Análisis de la capacidad de fabricación existente

Al planificar la fabricación del nuevo producto, se analizaron las instalaciones y técnicas de fabricación existentes para determinar cuáles habría que potenciar y qué técnicas y métodos nuevos serían necesarios. Como Alcatel Austria llevaba mucho tiempo fabricando equipos de telecomunicación y en particular PABX, disponía de todos los medios de fabricación tradicionales para esta clase de productos, incluyendo componentes electromecánicos (bobinas, etc.), piezas sueltas (metálicas y de plástico) y acabados metálicos, montaje de subunidades y unidades para productos electromecánicos, y una diversidad de instalaciones y equipos de pruebas.

La planta de fabricación, construida en 1970, estaba concebida como planta "universal" que pudiera adaptarse a las necesidades futuras. Por ello ofrecía una serie de importantes características, entre las que se incluía una gran flexibilidad de disposición por llevar todos los servicios (energía, agua, etc.) en canalizaciones aéreas, dejando el suelo libre. En consecuencia, salvo unas pocas áreas fijas (p. ej., las dedicadas a procesos químicos que requieren reciclaje y eliminación de residuos), la planta se podía redistribuir con un esfuerzo mínimo.

Con la introducción de tecnologías de productos semielectrónicos y electrónicos, se añadieron otros centros de fabricación:

- Fábrica de placas de circuito impreso, que se fue ampliando gradualmente para poder suministrar todas las placas

requeridas por los productos que fabrique Alcatel Austria y atender pedidos de otras casas.

- Centro de moldeo de poliuretano para las piezas de la carcasa y la cubierta, que demostró ser de gran utilidad para fabricar las piezas de la carcasa de la versión pequeña del 5200 BCS.
- Centro de ensamble de placas impresas que originalmente se dedicó a la fabricación de productos semielectrónicos y se ha ido ampliando para atender nuevas y crecientes necesidades de producción de PBA.

La conclusión de este análisis fue que se necesitaba o bien mejorar los métodos, instalaciones y procesos existentes en una serie de áreas, o bien desarrollar otros nuevos. La fabricación de placas impresas tuvo que potenciarse para permitir la producción de placas con mayor densidad de componentes. Igualmente hubo que elaborar nuevos métodos para la aplicación de mascarillas antisoldantes y recubrimientos protectores.

La línea de ensamble de placas impresas fue profundamente renovada, estableciendo una línea FMS (sistema de fabricación flexible) que incluía maquinaria de posicionado automático de componentes, una línea automática de transporte de placas impresas con estaciones de almacenamiento intermedio para ensambles manuales, una máquina de soldadura por doble ola controlada por ordenador, una unidad de limpieza de diseño propio y estaciones de inspección. Todas las posiciones de trabajo de la línea FMS estaban conectadas a la red de datos.

Los nuevos métodos de prueba y reparación de PBA que se introdujeron ponían el mayor interés en la implantación de métodos de prueba digitales y por MIC.

Se montaron nuevas posiciones de trabajo para subunidades, y se estableció una línea de ensamble final para sistemas completos que comprendía estaciones de prueba y diagnóstico final.

Ensamble FMS de placas impresas

En 1987 se creó una línea de ensamble FMS para PBA. Como éstas constituyen el núcleo de los sistemas electrónicos y su tiempo de producción es un factor crítico, se consideró importante introducir métodos JIT (justo-a-tiempo) para la fabricación de sistemas electrónicos. Las placas para todos los productos importantes de Alcatel Austria se fabrican en esta línea FMS de PBA.

Los principales objetivos eran asegurar un flujo de trabajo continuo con muy poco o ningún tiempo de preparación o cambio de

Línea de producción del sistema flexible de fabricación de PBA de Alcatel Austria.

un tipo de placa a otro, mantener una alta calidad de producto y bajas tasas de fallos, reducir costes de fabricación, y conseguir un tiempo de producción de uno a dos días para la placa equipada.

La valoración, planificación e instalación del sistema FMS y sus diversos subsistemas exigió una eficaz dirección de proyecto, involucrando a todos los departamentos relevantes: fabricación y prueba de PBA, control de producción, producción, ingeniería de pruebas e ingeniería industrial. Otros departamentos, tales como compras, control de calidad, proceso electrónico de datos, diseño y desarrollo de productos, y determinación de costes participaron asimismo intensamente.

La línea FMS se diseñó para fabricar PBA de anchura estándar y PBA multipanel (pequeñas placas que se juntan y tratan como una sola PBA durante la fabricación, y después de probadas se separan). Los objetivos fijados a la línea FMS se cumplieron merced a la implantación de las siguientes medidas:

- Se instaló un equipo de posicionado automático que permite colocar automáticamente al menos el 50% de todos los componentes. El gran número de tipos de PBA y de componentes en los sistemas de comunicaciones de empresa, y el limitado número de posiciones (ubicaciones) de componentes disponibles en dicho equipo de posicionado hacen necesario un control constante de los componentes de gran consumo para optimizar la utilización del equipo.
- Todas las estaciones de trabajo fueron informatizadas, bien mediante un microprocesador interno o por un sistema identificador de código de barras, para automatizar las instrucciones de trabajo, cargar el programa, guiar y controlar el flujo de materiales, planificar la producción, cargar la estación de trabajo, recoger y distribuir datos de producción y control de calidad, y los datos de nóminas.
- La carga diaria de la factoría y su producción se optimizaron mediante la simulación del volumen de trabajo y la carga de las estaciones individuales, respetando los criterios de prioridad.
- Se revisó totalmente el flujo de materiales para componentes y se modernizaron todas las rutinas y etapas de proceso en la inspección de entrada, preformado de los terminales de componentes, manipulación, almacenamiento y formación de conjuntos.
- Se instalaron nuevos equipos para el transporte y almacenamiento temporal de placas en la línea de ensamble, soldadura, limpieza y corte de las placas a su tamaño correcto.
- La disposición de la planta, que había evolucionado desde la apertura de la nueva factoría en 1970, se modificó para optimizar el flujo del proceso.

Prueba de placas de circuito impreso.

Para asegurar la obtención del máximo provecho de todas estas mejoras en la planta de fabricación, se impartieron cursos de capacitación, tanto para el personal directamente afectado como para los que prestan funciones de soporte.

La configuración del sistema FMS para PBA facilita la fabricación de la totalidad de las placas que produce Alcatel Austria. Aunque originalmente la atención se centró en el 5200 BCS, todas las placas del nuevo 5200 BCN se pueden fabricar con igual eficacia en la línea de ensamble FMS, excepto las que incorporan SMD (dispositivos de montaje superficial). El advenimiento de la tecnología SMD obligó a añadir nuevos medios de fabricación en la factoría, incluyendo equipo de posicionado automático de componentes, hornos de infrarrojos para curar el pegamento, máquinas de soldar por doble ola controladas por ordenador y equipo de transporte.

La figura 1 muestra los principales elementos del sistema FMS para PBA. Se ha admitido la necesidad de extender estos principios y métodos de FMS "justo a tiempo" a otras actividades de fabricación, tales como el ensamble de productos, y ello se está llevando a la práctica.

Aseguramiento de la calidad

El aseguramiento de la calidad para el 5200 BCS está basado en varios aspectos

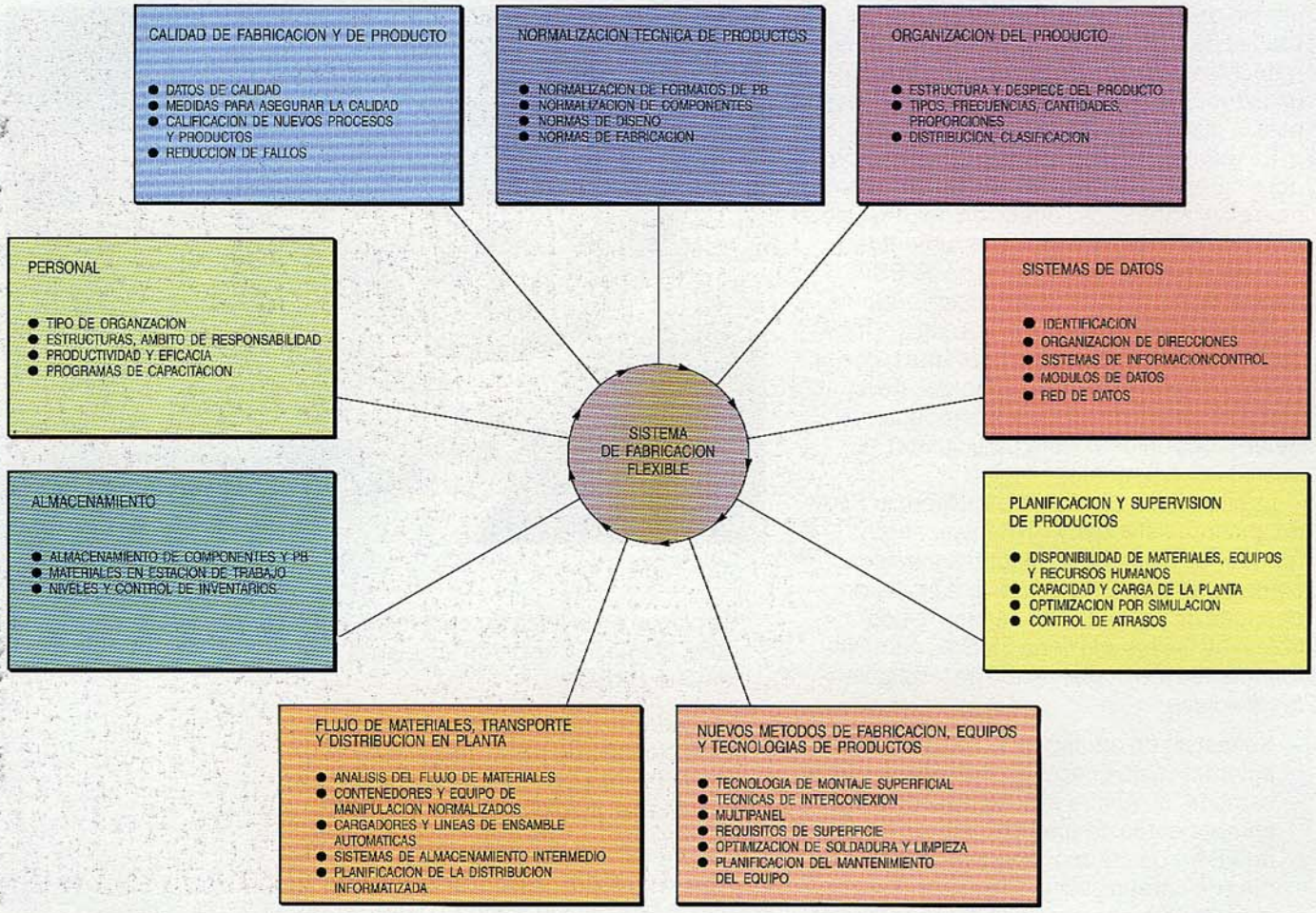


Figura 1
Gráfico de las principales áreas de actividad del FMS de PBA en Alcatel Austria.

esenciales en la concepción y el método de fabricación del producto. Se inicia con la selección de componentes, basada en los procedimientos de normalización y calificación de componentes incluidos en el programa de compras a gran escala de Alcatel. Además, durante el diseño se incorporan rutinas de autoprueba al soporte lógico del producto para facilitar las pruebas y localización de fallos durante la fabricación, la instalación y el mantenimiento.

La inspección de entrada de componentes es un elemento vital en cualquier programa de calidad. Inicialmente, las pruebas se basan en inspecciones al 100% de los componentes, hasta los de integración en mediana escala. No obstante, cuando se dispone de suficientes datos estadísticos de los suministradores para garantizar la calidad del componente, las pruebas se realizan por muestreo (pruebas adaptativas), dependiendo la cantidad de muestras y el grado de severidad del comportamiento de cada suministrador respecto a calidad. El objetivo es poder enviar directamente los componentes al almacén, o incluso al taller, sin ninguna inspección de entrada. Es corriente utilizar casas especializadas en pruebas de circuitos integrados a gran escala (LSI y VLSI), además de realizar auditorías de calidad en las instalaciones de los suministradores.

En diversos puntos se ofrece la verificación automática de que los componentes se han posicionado correctamente, así como comprobaciones manuales. Todas las placas se someten a pruebas en-circuito y a otras varias funcionales (incluyendo transmisión y conmutación), generalmente con equipos comerciales de prueba. Donde haya requisitos específicos del producto, se construirá con módulos estándar un equipo de prueba especial (tanto el soporte físico como el lógico). A nivel de subunidad se realizan pruebas funcionales sobre partes tales como fuentes de alimentación, consolas y unidades centrales de proceso. La prueba final de unidades se efectúa sobre unidades completas, unidades parciales y conjuntos formados para exportación. El equipo de prueba diseñado y construido para el 5200 BCS sirve igualmente para el nuevo 5200 BCN.

La mayoría de los equipos de prueba están conectados a una red de área local de manera que les puedan ser cargados los programas correspondientes y los datos sobre calidad devueltos al ordenador central. Los equipos y sistemas de prueba suplementarios incluyen programadores de

ROM, estaciones de diagnóstico y sistemas expertos para diagnosis de fallos.

Las reparaciones de campo tras el diagnóstico inicial son encaminadas a través de las estaciones de diagnóstico y prueba de producción, bajo la guía del taller central de este tipo de reparaciones. El mantenimiento a distancia es un aspecto importante del servicio postventa. Así, un centro situado en Alcatel Austria permite detectar los problemas y gestionar la configuración de producto de un sistema instalado en cualquier lugar del mundo.

No obstante, ni los más avanzados programas de diseño, fabricación y pruebas pueden por sí mismos garantizar una alta calidad. El eslabón más importante de la calidad en todos los procesos sigue siendo el compromiso de todos los que en ellos intervienen, conscientes de la necesidad de calidad y de los objetivos en esta materia.

Los niveles de calidad de fabricación se vigilan constantemente. Antes de lanzar un producto nuevo, se le somete a severas pruebas de calificación del propio producto y del proceso utilizado.

Ensamble de sistemas de comunicaciones de empresa

Se han establecido numerosas estaciones de trabajo especiales, pequeñas líneas de montaje de subunidades y una línea principal deslizante sobre rodillos para el ensamble de sistemas en armarios. Para los sistemas pequeños de instalación mural se utiliza una línea independiente de ensamble. En la línea principal se monta el armario, se conectan las subunidades y se fabrican las placas. Finalmente, el sistema completo pasa por los puestos de prueba (y en caso necesario por las estaciones de diagnóstico), antes de salir de la línea de producción y pasar al área central de terminación y embalaje.

Operaciones informatizadas

La planificación de pedidos y el control del proceso, el flujo de instrucciones y de información hacia y desde los puestos de trabajo, y la recogida de datos sólo pueden manejarse eficazmente mediante ordenador. Los tres centros de cálculo de Alcatel Austria se interconectan con el fin de disponer de todos los datos necesarios para la fabricación. Los datos técnicos de producto procedentes del ordenador principal se unen con los datos variables de control de producción e ingeniería de fabricación. De esta manera se tratan la planificación de pedidos y de capacidad, la simulación del plan cronológico, la carga de fábrica y los datos sobre calidad, nóminas y mantenimiento.

La internacionalización del 5200 BCS, exportado a más de 50 países, requiere una constante optimización de la gestión de ubicaciones* en la fábrica. Todo ello se inscribe en un concepto CIM a nivel de compañía que se utiliza también plenamente para la producción de sistemas y redes de comunicaciones de empresa.

Producción de material

Las rutinas MRP (planificación de necesidades de materiales) son valiosas herramientas de planificación para determinar cuándo debe ponerse en marcha un pedido para satisfacer la fecha de entrega, cumpliendo así los principios de entrega "justo-a-tiempo" y evitando la necesidad de lanzar pedidos de "último minuto" con sus correspondientes penalizaciones de coste. El alto valor de los componentes en los productos electrónicos hace que esto sea muy importante para reducir al mínimo los costes de fabricación y asegurar la disponibilidad de componentes. La compra masiva de componentes y materiales para toda la compañía, unida a las restricciones acordadas sobre tipos de componentes aprobados ha contribuido a moderar los precios y a incrementar la flexibilidad.

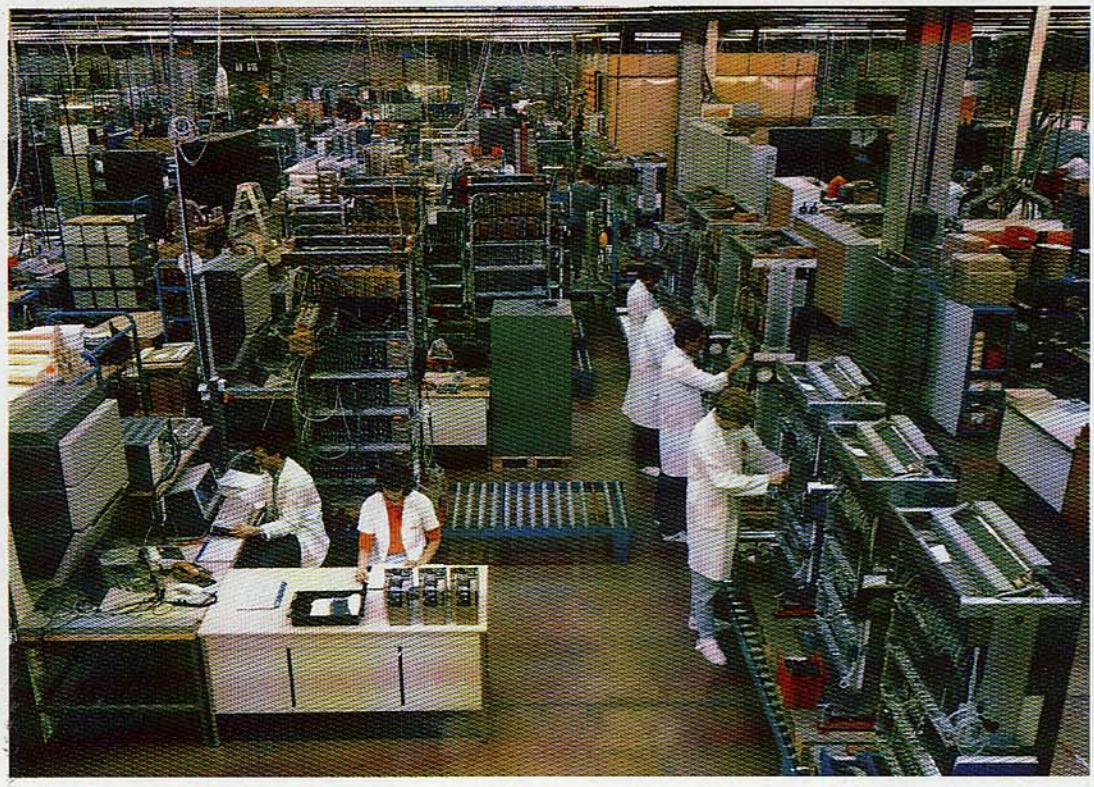
Recursos humanos

Las herramientas y técnicas modernas reducen la mano de obra directa necesaria para fabricar un producto, pero al mismo tiempo exigen mayores conocimientos y experiencia, a menudo en terrenos nuevos. Así, la formación y el adiestramiento especializado son de extrema importancia en el lanzamiento de nuevos productos o la introducción de mejoras importantes.

Para asegurar la obtención del máximo beneficio de todas las mejoras realizadas en la factoría, la plantilla de fabricación entera, desde el supervisor hasta el operario de taller, recibió una capacitación adecuada,y de ella participaron todos los grupos de soporte, como el departamento de mantenimiento, control de producción y personal de ingeniería de fabricación.

Además, el departamento central de formación de Alcatel Austria desarrolló cursos orientados al producto para los

* La gestión de ubicaciones controla el uso de componentes de gran consumo para asegurar la utilización óptima del limitado número de estaciones de ensamble en las máquinas automáticas de posicionado.



Línea principal de ensamble para el sistema Alcatel 5200 BCN.

sistemas 5200 BCS y 5200 BCN, y sesiones de capacitación para el personal de ventas, instalaciones y mantenimiento. Inicialmente estos cursos se impartieron a personal de Alcatel Austria, pero al crecer el mercado de exportación la formación se extendió a distribuidores, agentes y personal de instalaciones y mantenimiento de otros países.

La capacitación sobre el equipo de fabricación suministrado para proyectos de exportación fue impartida tanto en Alcatel Austria como en el extranjero.

Conclusiones

Desde que comenzó a fabricarse el 5200 BCS en 1984, se han producido más de un millón de líneas, suministradas a más de 50 países. En esta cantidad se incluyen sistemas completos, sistemas parcialmente ensamblados y conjuntos de materiales para varias configuraciones. Con la ayuda de personal de ingeniería de concesionarios, asociadas y varias compañías Alcatel se han desarrollado versiones del sistema adaptadas a distintos países. Al mismo tiempo, el sistema se ha potenciado en las áreas de comunicación de datos, formación de redes y nuevos servicios.

Con la introducción de métodos avanzados de fabricación, los tiempos de producción se redujeron drásticamente desde seis semanas hasta una o dos semanas, los costes de fabricación descendieron alrededor del 30%, y el inventario bajó casi un 50%.

Günter W. Hasler nació en Alemania en 1936. Estudió en Alemania y Canadá donde trabajó como ingeniero industrial en industrias de productos para la defensa y electricidad de consumo. En 1965 regresó a Europa, entrando en Alcatel Austria en 1967 como director de ingeniería industrial. En los últimos años se ha dedicado intensamente a las técnicas avanzadas de fabricación y a la transferencia de tecnología hacia y desde Alcatel Austria, así como en proyectos de exportación relacionados con la fabricación.

Fabricación de equipo de microondas para telecomunicación

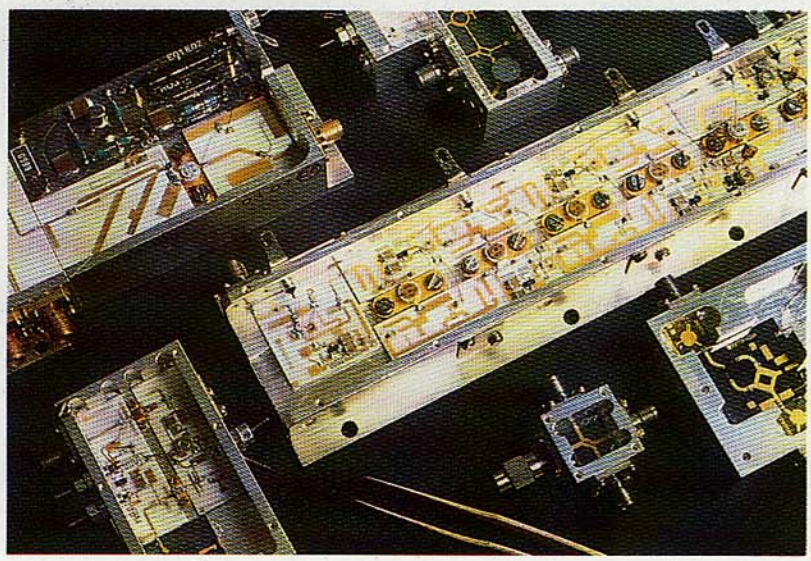
Los componentes para microondas trabajan a frecuencias muy altas, obligando a utilizar equipos y procedimientos de fabricación que garanticen una gran precisión constructiva y estabilidad a largo plazo, y que se complementarán con minuciosas pruebas para asegurar el cumplimiento de severas exigencias funcionales.

J.-P. Chenu
Alcatel ATFH, Levallois Perret, Francia
G. Erdmann
H. Müller
Alcatel SEL, Pforzheim, República Federal de Alemania

Introducción

Los radioenlaces de microondas ofrecen una alternativa de transmisión a los cables coaxiales y de fibra óptica, y cumplen con todos los requisitos de disponibilidad y calidad de transmisión especificados en las recomendaciones del CCITT y del CCIR para sistemas de transmisión. Hasta finales de los años setenta, se utilizaban radioenlaces analógicos para transmitir señales de televisión y telefonía por todo el mundo. La primera generación de radioenlaces digitales fue introducida paralelamente al paso de analógico a digital en los equipos de conmutación y transmisión. Hoy día, los sistemas analógicos se restringen a unas pocas aplicaciones, tales como la distribución de televisión.

Unidades con circuitos integrados para microondas.



Los modernos sistemas de microondas digitales, con capacidades que van de 2 a 140 Mbit/s, se utilizan principalmente en:

- sistemas de transmisión de larga distancia (140 Mbit/s, hasta 13 GHz)
- enlaces regionales (34 Mbit/s)
- enlaces urbanos (de 2 a 140 Mbit/s, hasta 22 GHz)
- redes privadas y enlaces de tipo rural (2 Mbit/s).

La fabricación de microondas es un proceso de producción típico en el que intervienen componentes de muchas clases y se fabrica por pequeños lotes. La variedad de productos y la compleja tecnología requerida para las bandas de alta frecuencia exigen una estrecha cooperación entre los grupos de desarrollo y de producción ubicados en un mismo lugar. Los osciladores, mezcladores, amplificadores y filtros utilizados en los sistemas de radioenlace requieren una gran precisión mecánica para asegurar una operación sin fallos (la tolerancia tipo es de ± 0,03 mm).

Un sistema de microondas de 140 Mbit/s suele constar, además del equipo de banda base, de varias unidades de RF: transmisor, receptor y unidad de derivación con línea de RF. Incorpora 21 placas de circuito impreso, 10 unidades de microcinta y 237 piezas mecánicas. Entre placas y unidades de microcinta contienen un total aproximado de 1000 resistencias, 460 condensadores, 160 bobinas y 240 semiconductores (transistores, diodos y circuitos integrados). Los componentes mecánicos comprenden 90 piezas fresadas, 70 torneadas y 74 piezas metálicas laminadas.

Un sistema complejo puede tener más del doble de este número de componentes.

Fabricación integrada por ordenador

Con el fin de producir esta gran variedad de piezas y productos del modo más económico posible, Alcatel ha instaurado un sistema de fabricación integrada por ordenador (CIM) merced al cual pueden obtenerse productos mediante sistemas de fabricación flexibles basados en la filosofía de "justo-a-tiempo". El sistema CIM integra todas las etapas del ciclo de vida de un producto, desde la ingeniería al servicio postventa y la ingeniería de calidad (Fig. 1).

Tecnología de microondas

Circuitos integrados de microondas
La tecnología MIC (*microwave integrated circuit*, circuitos integrados de microondas), aplicable a circuitos híbridos de película delgada, es adecuada para equipos que trabajan a más de 1 GHz, permitiendo al diseñador combinar en una sola unidad estructuras distribuidas y elementos concentrados (inductancias, condensadores, resistencias). Las estructuras distribuidas o líneas de transmisión pueden adoptar tres formas; la más común es la *microcinta*, en la que la línea de transmisión es el conjunto de una tira conductora a un lado de un sustrato dieléctrico, y un plano de masa al otro lado. Las otras dos formas son la estructura coplanar, con la tira conductora y el plano de masa situadas al mismo lado del sustrato, y la línea ranurada, en la que la línea de transmisión consiste en una ranura grabada en la metalización de una cara del sustrato.

Con miras a optimizar el diseño del circuito, es posible combinar en el mismo sustrato elementos concentrados y estructuras diversas de línea de transmisión. Como las propiedades dieléctricas del sustrato y las eléctricas de las capas metalizadas pueden fácilmente reproducirse, la precisión y la reproductibilidad de las prestaciones del circuito dependen sobre todo de las características del semiconductor y de la exacta geometría del circuito.

Se pueden utilizar diversos materiales como sustrato, dependiendo del tipo de circuito. Las principales características que se les exigen son: una buena conductividad térmica para disipación calorífica, una baja tangente de ángulo de pérdidas en cuanto a las pérdidas en el dieléctrico, y una constante dieléctrica idónea para la velocidad de transmisión. Dependiendo de la frecuencia, la alúmina (hasta 10 GHz) y el vidrio de sílice (más de 10 GHz) son los materiales utilizados más a menudo en los circuitos típicos, mientras que las ferritas y granates se emplean en circuitos no recíprocos (aisladores y circuladores).

Para evitar interferencias entre MIC y circuitos externos causadas por transmisión de espurios, los MIC deben encerrarse en cápsulas metálicas elaboradas a máquina; éstas se diseñan partiendo de las dimensiones y tolerancias del circuito y con sujeción a numerosas reglas de diseño que cubren las características mecánicas y de dilatación térmica del sustrato, el espesor y propiedades metalúrgicas de las capas depositadas, las propiedades mecánicas y de dilatación del metal de la cápsula, el grosor y las propiedades metalúrgicas de los depósitos electrolíticos de las capas, además de cualquier restricción propia de las microondas.

Los MIC utilizan semiconductores en los encapsulados discretos para microondas, en las pastillas sin recubrir, y en los componentes con conductores soporte (para reducir el tamaño o los efectos parásitos causados por los terminales). La cápsula puede estar o no herméticamente cerrada según sea el componente y las condiciones ambientales. Las dimensiones usuales de estos circuitos están entre 12 y 75 mm.

Circuitos integrados monolíticos de microondas
En los MMIC (circuitos integrados monolíticos de microondas) se aplica una tecnología de circuitos integrados específica para frecuencias de microondas, con un enfoque equivalente al del uso de células estándar para los circuitos lógicos. El diseñador parte de una biblioteca de componentes activos y pasivos que reseña sus propiedades eléctricas, mecánicas y térmicas.

La tecnología MMIC fue desarrollada en Estados Unidos por el Departamento de Defensa y unas 50 compañías importantes con el fin de definir tecnologías y herramientas adecuadas para el diseño de circuitos integrados analógicos y digitales de GaAs en aplicaciones militares. Se puede acceder hoy en el mercado a esta nueva tecnología a través de varias compañías que prestan un servicio que podría llamarse "confección". Estas compañías ofrecen bibliotecas de características físicas, térmicas y eléctricas apropiadas para los procesos de diseño y simulación elegidos y, una vez calificadas, pueden fabricar prototipos y lotes de producción. Las dimensiones de los circuitos varían de 1 a 6 mm.

Partiendo de esta biblioteca, Alcatel realiza todo el trabajo de ingeniería física y eléctrica, incluido el trazado de los circuitos, y envía información a la „confección"

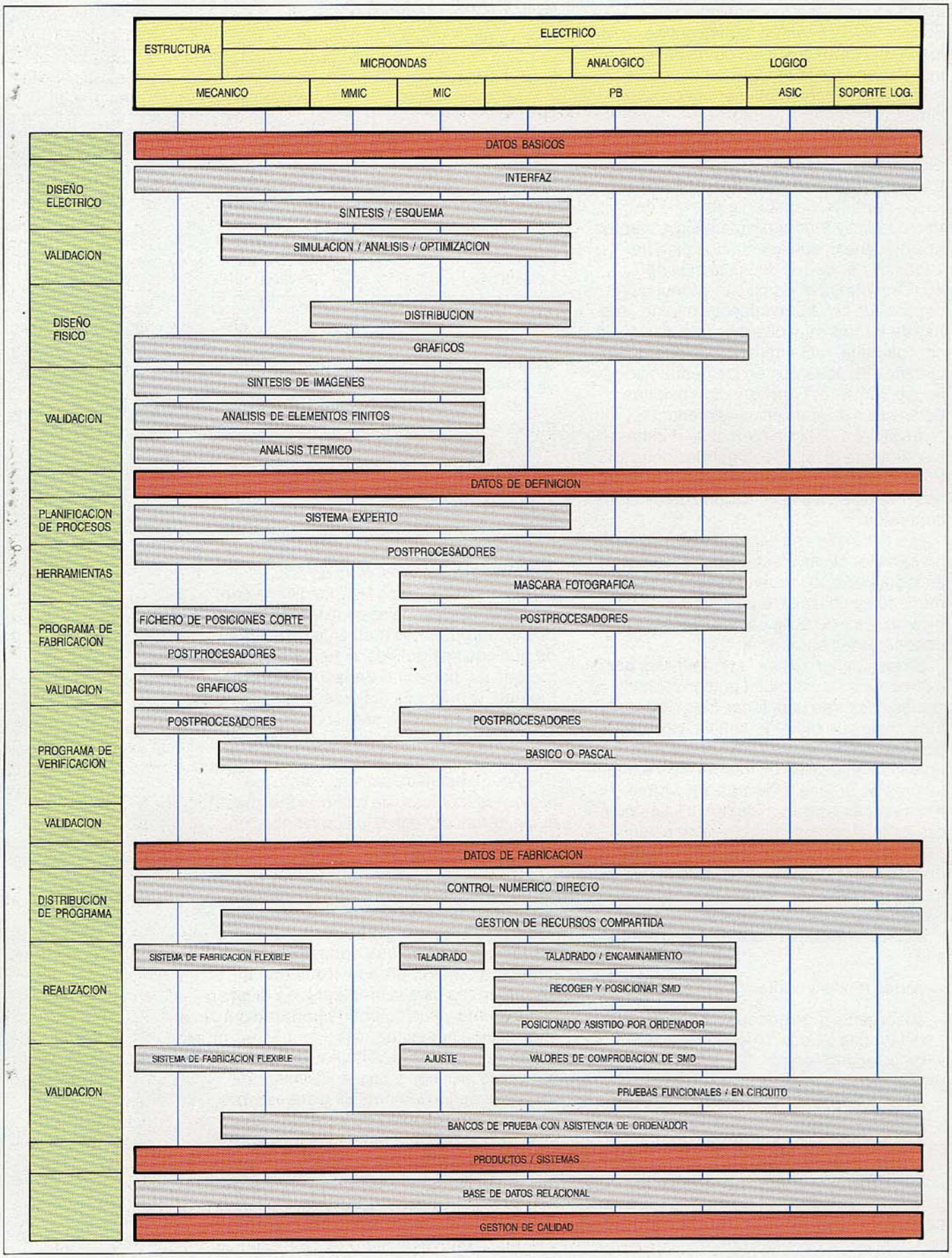


Figura 1
Esquema de un sistema para ingeniería, diseño, planificación de procesos y fabricación con asistencia de ordenador (CAE, CAD, CAPP y CAM).

utilizando el formato normalizado Stream GDS2. Pueden suministrarse circuitos MMIC probados, bien como pastillas a integrar en un circuito MIC o bien en un encapsulado para montar sobre placa de circuito impreso.

Guiaondas

Las tecnologías de guiaondas y tubos coaxiales permiten transportar energía de microondas y formar cavidades resonantes. Los guiaondas son adecuados para frecuencias desde 1 GHz hasta más de 40 GHz, ofreciendo una baja atenuación combinada con buen apantallamiento. Los hay de formas muy diversas (circular, elíptica, cuadrada, rectangular), y de diferentes tamaños de acuerdo con las frecuencias de funcionamiento. Formas y dimensiones están normalizadas nacionalmente (ej., norma DIN 47302 en Alemania) e internacionalmente (p. ej., Recomendaciones 153 y 154 de la CEI), y además existen numerosos modelos para aplicaciones de usuarios concretos.

Los materiales se eligen de acuerdo con las características eléctricas, mecánicas y ambientales que requiere la aplicación. A menudo se utiliza el recubrimiento galvánico de oro y de plata para aumentar la conductividad superficial.

En los comienzos de la transmisión por microondas se utilizaban guiaondas y cables coaxiales para todas las unidades funcionales de radiofrecuencia. Hoy día los guiaondas solamente se emplean para unidades selectivas de frecuencia y alimentadores de antena, mientras que virtualmente todas las subunidades utilizan técnicas de microcintas: incluso ya se están realizando algunas con tecnología MMIC, y en el oscilador local se emplea la nueva tecnología de *oscilador resonador dieléctrico.*

Las restantes aplicaciones de guiaondas son:

- partes rectas y conformadas de guiaonda
- absorbentes, guiaondas en hélice, guiaondas unidos, filtros ramificadores de polarizaciones
- filtros de derivación de canal, de banda lateral, de banda eliminada
- circuladores y de guiaonda.

Los materiales utilizados para unidades de guiaondas deben tener un bajo coeficiente de dilatación, así como una gran conductividad para evitar pérdidas por reflexión y efecto pelicular, lo cual por desgracia conlleva un alto coste de equipamiento y fabricación del material. En consecuencia, las unidades de guiaondas se clasifican según sus necesidades en alta frecuencia como se muestra en la tabla 1.

Tabla 1 – Tipos de guiaonda

Especificación técnica	Material	Superficie interna
Determinación de frecuencia, estable a temperatura	Invar Vidrio de cuarzo	Plata Oro
Otras aplicaciones	Cobre	Plata Níquel
	Bronce	Plata
	Aluminio	Cromato Plata
	Acero inoxidable	Nada
	Plata alemana (aleación Co-Ni)	Nada

Cuando se unen varias unidades de guiaondas construidas de diferentes materiales, hay que poner cuidado en reducir al mínimo los pares galvánicos que puedan originar corrosión. En caso necesario pueden introducirse elementos de ecualización.

Ingeniería de encapsulado de MIC

El encapsulado de los MIC se diseña con arreglo a las dimensiones externas de los diferentes sustratos mediante un sistema de gráficos interactivos, siguiendo un método dirigido por ordenador. Según tal método, la memoria del ordenador almacena todas las reglas para el diseño de la cápsula, y el operador es guiado paso a paso por el ordenador a través de todo el diseño. El resultado satisface tanto los requisitos técnicos (de microondas, mecánicos, térmicos) como los de fabricación, sin necesitar ninguna comprobación más.

Generación de planes de proceso MIC

Un plan de proceso contiene la serie de etapas o de operaciones a realizar, la máquina o proceso que debe utilizarse, el centro de coste implicado, los tiempos normalizados para la preparación y el funcionamiento y cualquier otra herramienta o información necesaria.

Hay dos modos de automatizar la planificación de procesos. La planificación por variantes define los nuevos planes de proceso por modificación de los existentes, y se la utiliza generalmente en unión de sistemas de clasificación y codificación de procesos. En este método se recuperan los planes de proceso para partes similares utilizando los códigos de tecnología de grupo, y se modifican manualmente para acomodarse a las nuevas necesidades, lo que puede introducir retrasos y errores.

La planificación generativa, por otra parte, produce automáticamente un plan de pro-

ceso partiendo de cero. Aventaja al método de variantes por ser enteramente automática, si bien es más costosa de llevar a cabo y sólo es factible en un entorno exclusivamente CIM. El sistema de planificación generativa utiliza técnicas de inteligencia artificial para generar automáticamente los planes de proceso y asegurar que el conocimiento relevante se mantiene accesible. Este sistema está integrado, lo que significa que consulta la definición de la base de datos y envía el resultado de su "peritación" directamente a la base de datos de fabricación sin intervención manual alguna. Está al alcance de cualquier terminal autorizado dentro de la red de área local.

Ingeniería de guiaondas

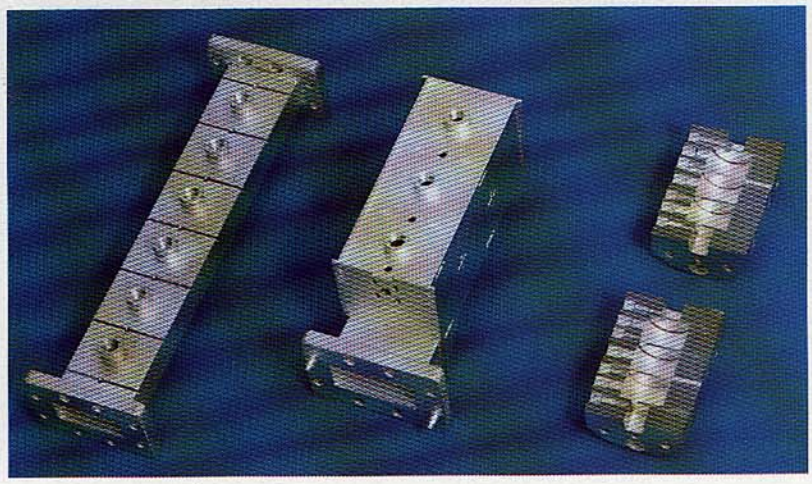
La ingeniería de guiaondas se basa en cálculos realizados sobre modelos físicos. Para asegurar que se satisfacen las severas exigencias sobre la pendiente de corte del filtro y la atenuación en la banda de paso y en la banda eliminada, se optimizan los modelos por estudios experimentales.

Hoy día, la ingeniería de guiaondas se apoya en estaciones de trabajo CAD. No obstante y al contrario que en el desarrollo de MIC y MMIC, no existen programas comerciales de simulación y optimización. Se requieren estructuras de guiaonda diferentes según el margen de frecuencias, el diseño mecánico de las unidades de transmisión de microondas y el diseño del bastidor.

Se consideran aquí como ejemplos tres tipos de filtro de RF:

- filtro de banda lateral de 8 GHz, construido según técnicas de guiaondas
- filtro de canal de 6,7 GHz, de construcción en caja
- filtro de canal de 15 GHz, de construcción en bloque.

Componentes de guiaonda realizados con diferentes técnicas de construcción: filtro de banda lateral de 8 GHz en técnica de guiaonda (izquierda), filtro de derivación de canal de 6,2 GHz en caja (centro), y filtro de derivación de canal de 15 GHz en construcción de bloque (derecha).



Como todas estas unidades son selectivas en frecuencia, invar es el único material que puede utilizarse en su construcción a causa de su bajo coeficiente de dilatación.

Construcción en guiaondas: este método utiliza un guiaondas recto de dimensiones normalizadas como material básico. Las cavidades resonantes se producen dividiendo el guiaondas en recintos con paredes soldadas, en las que se han practicado ranuras con gran precisión para el acoplamiento en alta frecuencia. A cada recinto se le agrega un pistón con manguito roscado para sintonizar la frecuencia. Por último, tras la soldadura, la unidad se platea para mejorar su conductividad.

Construcción en caja: es mas compacta que la construcción en guiaondas. El filtro se ensambla a partir de láminas individuales de metal, cuya fabricación requiere máquinas de alta precisión en el corte. La reciente disponibilidad de máquinas de estampado de control numérico significa que podrán evitarse costes tan elevados sin deteriorar la calidad. Las láminas separadas se platean antes de su ensamble y después se sueldan con aleación de plata.

Construcción en bloque: las cavidades individuales se disponen en secuencia como en la construcción en guiaondas, pero cada recinto se obtiene por fresado o abrasión del material del bloque. Dado el mayor espesor de las paredes no se necesitan manguitos roscados para los tornillos de sintonización de frecuencia. Los elementos individuales se platean, se ensamblan para formar un bloque, y después se atornillan y sueldan entre sí.

Fabricación y pruebas de microondas

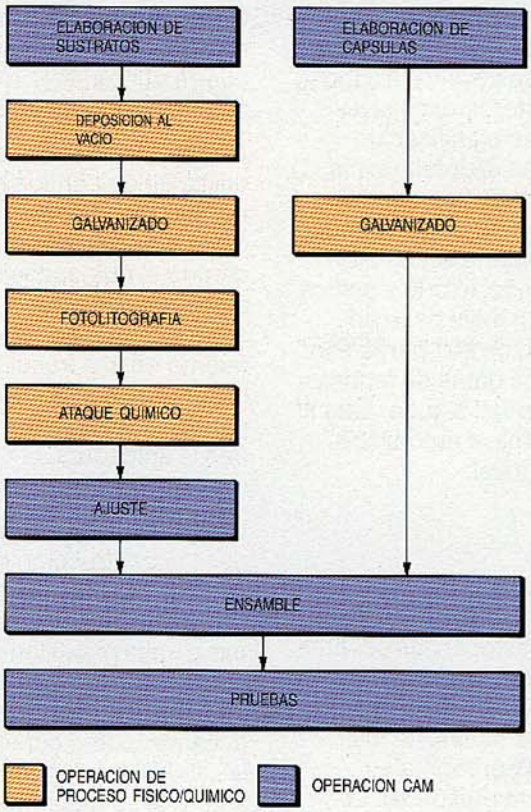
Fabricación de MIC

La fabricación de MIC incluye: elaboración por máquina y recubrimiento galvánico de cápsulas, tratamiento mecánico del sustrato, deposición en vacío, fotolitografía, ataque químico y ajuste de valor de los componentes (Fig. 2).

El sustrato se monta primero en la cápsula y a continuación se añaden los componentes a dicha cápsula o sustrato. Algunas operaciones son típicas de CAM y requieren información de control numérico. Otras son operaciones físicas o químicas por lotes que exigen un estrecho control de numerosos parámetros independientes del circuito que se fabrica (por ejemplo, recubrimiento del sustrato en vacío, galvanizado de la cápsula).

Fabricación de cápsulas: las cápsulas se elaboran mediante una máquina flexible,

Figura 2
Fabricación de circuitos integrados de microondas.



enteramente automática, que prácticamente no requiere ningún tiempo de preparación; las herramientas se seleccionan de un almacén con 180 posiciones, y las materias primas de otro almacén con 40 posiciones. Esta máquina sirve, pues, para producir una gran variedad de piezas en cantidades variables porque funciona en modo totalmente desatendido. Además la máquina puede verificar automáticamente que las dimensiones finales de las piezas concuerdan con los valores de diseño. El galvanizado de la cápsula lo hace un robot en baños electrolíticos cuidadosamente controlados.

Fabricación de sustratos: las etapas principales son la elaboración por máquina, limpieza, deposición al vacío, fotolitografía, ataque químico, ajuste del valor del componente, soldadura del sustrato en la cápsula, montaje de componentes discretos, y pruebas funcionales. En conjunto, más de cien operaciones básicas.

Elaboración de sustratos: comprende tres operaciones: taladrado por láser con equipo de control numérico, corte con equipo especial e incisión con láser. Los sustratos producidos a máquina deben luego pasar por una limpieza minuciosa para hacer desaparecer cualquier impureza introducida durante su manejo y proceso, operación crítica por el alto nivel de adhesión necesario entre el sustrato y la capa depositada (superior a 3 kg/mm^2), sólo alcanzable por enlaces químicos. En esta fase se utilizan tanto métodos mecánicos como químicos. Los sustratos quedan almacenados a la espera de la deposición al vacío en condiciones de control riguroso.

Deposición al vacío: esta fase incluye ataque químico por pulverización, degasificación térmica para mejorar la calidad de la superficie del sustrato, y deposición también por pulverización de una capa resistiva, una capa barrera de adhesión/difusión, y una capa conductora en ambas caras del sustrato para formar el plano de masa y las tomas de masa a través de taladros.

Capa resistiva: se forma por pulverización reactiva; la resistividad tiene que encontrarse en un margen de decenas de ohmios por cuadrado con un coeficiente de temperatura para la resistencia cercano a −50 ppm (partes por millón) por °C, y una estabilidad mejor que 0,1% durante la vida del producto.

Capa barrera de adhesión/difusión: esta capa, situada entre las capas resistiva y conductora, se realiza mediante pulverización del compuesto metálico deseado, evitando así la necesidad de dos capas diferentes, una para proporcionar adhesión y la otra para actuar como barrera de difusión.

Capa conductora: se obtiene mediante pulverización del material de oro deseado; puede realizarse directamente con el espesor requerido o bien depositarse una capa delgada que después se recubre electrolíticamente para conseguir el grosor necesario.

Galvanizado: el recubrimiento electrolítico del sustrato se realiza por un robot en baños controlados; la capa de oro se inspecciona luego en cuanto a espesor, conductividad (cercana a la del oro macizo) y soldabilidad.

Fotolitografía: esta fase incluye la cobertura fotoresistiva, la exposición y el revelado, y se realiza en una zona limpia en la cual un flujo laminar de aire filtrado pasa sobre una estación de trabajo limpia. El recubrimiento se aplica con una técnica de pulverización electrostática, tanto en materiales positivos como negativos, para controlar el espesor y la uniformidad de la capa sobre sustratos taladrados, grandes y rectangulares. La exposición se realiza con un instrumento especial que permite alabeo y grosor no uniforme del sustrato, y a continuación se realiza el revelado mediante las técnicas normales.

Ataque químico: mediante técnicas que aseguran la precisión y definición requeridas se realiza el ataque en seco o húmedo.

Este último utiliza tres agentes químicos conjuntamente con un cuidadoso proceso de descontaminación controlado que asegura la precisión geométrica y la fiabilidad del circuito. La otra alternativa, el grabado en seco, se lleva a cabo por ataque iónico: las capas se desprenden al bombardear el sustrato con iones de argón neutralizados que tienen energía suficiente para sobrepasar la energía de unión de los átomos de la superficie. Cada partícula incidente puede desprender uno o más átomos de la superficie. La velocidad de la erosión depende de la naturaleza y propiedades físicas de la capa, haciendo posible un grabado selectivo.

Ajuste: esta fase ajusta las resistencias integradas para conseguir los valores requeridos y la estabilidad contra el envejecimiento. Esto se consigue alterando ya sea el espesor (en un margen de 150 capas atómicas) o la longitud de la resistencia, dependiendo de la frecuencia de trabajo y de las dimensiones. La estabilidad se ajusta por tratamiento térmico y oxidación inicial.

Ensamble: incluye unión por termocompresión, adhesión del sustrato a la cápsula y soldadura de componentes. La unión por termocompresión realiza la soldadura de dos materiales sin más que aplicar presión y calor; no se utiliza corriente eléctrica. Se emplea para hilos de oro y componentes con conductores soporte. La adhesión por soldadura blanda se aplica a las conexiones mecánicas y asegura una masa perfecta para microondas entre el sustrato y la cápsula; se lleva a cabo en hornos de atmósfera controlada utilizando preformas de aleación de bajo punto de fusión. La soldadura, en fin, se realiza precalentando la subunidad en una placa y utilizando un soldador que trabaja con una aleación de bajo punto de fusión, además de un microscopio binocular.

Fabricación de guiaondas

La reproductibilidad de las características de alta frecuencia ocupa el primer lugar en la producción de todo componente de guiaondas. Ello implica una gran precisión en las formas y dimensiones, acabado de superficies sin rugosidad, bordes netos sin rebabas y limpieza de las superficies conductoras.

La construcción de componentes de microondas viene determinada por los requisitos de la alta frecuencia y del montaje. La tabla 2 resume las numerosas tecnologías de fabricación utilizadas para producir unidades de guiaondas; algunas de ellas son las mismas que en la construcción de las cápsulas. Para la producción de tales componentes son esenciales unos operarios especializados y una factoría bien equipada. La figura 3 expone los medios disponibles en Alcatel SEL para la producción de guiaondas.

Tabla 2 – Tecnologías de producción para componentes de microondas

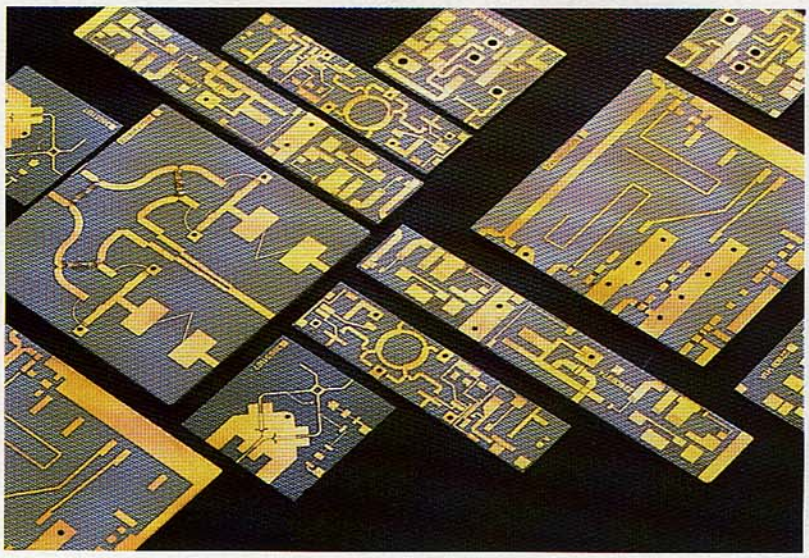
Tecnología	Ejemplos
Tornear por control numérico	Tornillo sintonizador, manguitos roscados
Fresar por control numérico	Piezas de filtros RF, cápsulas de unidades microcinta, componentes de guiaonda, circuladores y
Aserrar, ranurar	Filtros de guiaonda, guiaondas cuadrados y conformados
Taladrar, terrajar, roscar	Cápsulas, cubiertas, filtros y resaltes de guiaondas
Erosionar por descarga	Piezas sólidas de invar para filtros
Alisar y perfeccionar acabado a mano	Cápsulas y cubiertas, piezas laminadas metálicas
Galvanizar	Filtros, piezas de filtro, guiaondas conformados, circuladores
Soldar, estañar	Filtros RF, guiaondas rectos y conformados
Encolar	Materiales absorbentes
Atacar, grabar	Placa ranurada (blindaje)

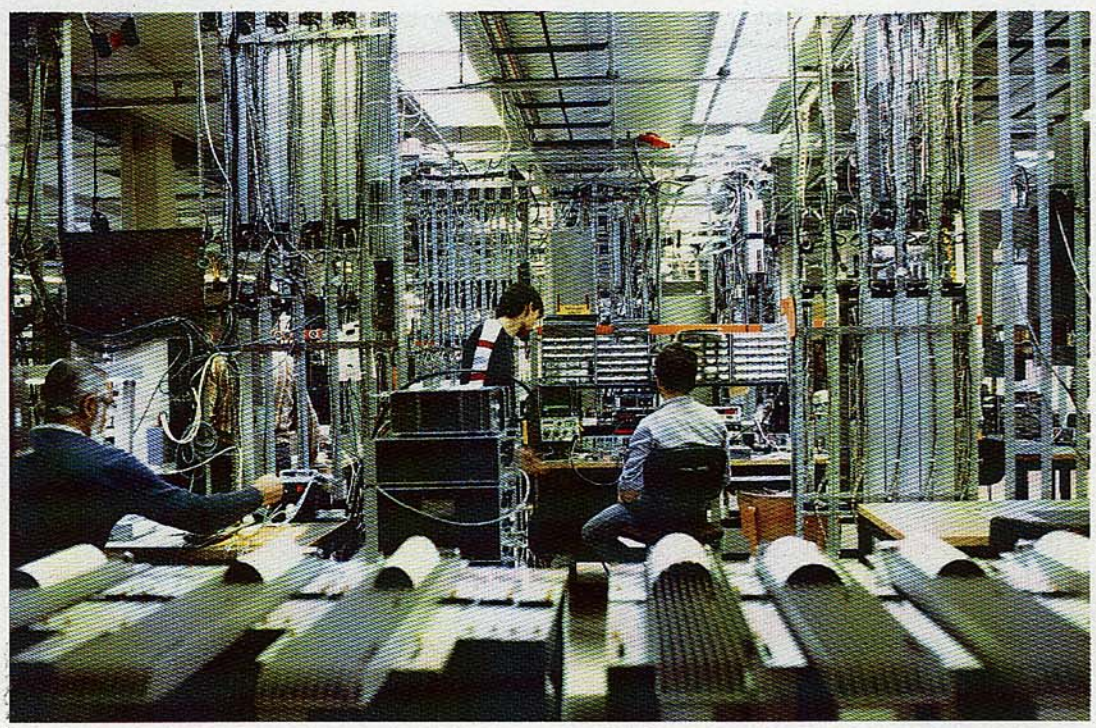
Se ha instalado un potente sistema de planificación de producción para controlar la gran variedad de pedidos y etapas de fabricación. Los productos se prueban después de cada etapa crítica de la producción y, finalmente, se utiliza un refinado sistema de aseguramiento de calidad y proceso para comprobar que los componentes terminados alcanzan los elevados niveles de calidad exigidos a los componentes de microondas.

Ensamble y prueba

El ensamble se divide en preensamble, ensamble de módulos y ensamble del

Sustratos de circuitos integrados para microondas.





Ensamble y pruebas finales.

equipo. Se entiende por preensamble la producción de subunidades como circuladores, aisladores, osciladores, mezcladores y amplificadores de RF, realizada en condiciones de zona limpia por personal altamente cualificado. Las placas de circuito impreso y los módulos de microondas se montan en una caja y se interconectan por el alambrado oportuno.

El ensamble de equipos de radioenlace es mucho más exigente que el de otros equipos de transmisión en los que sólo hay

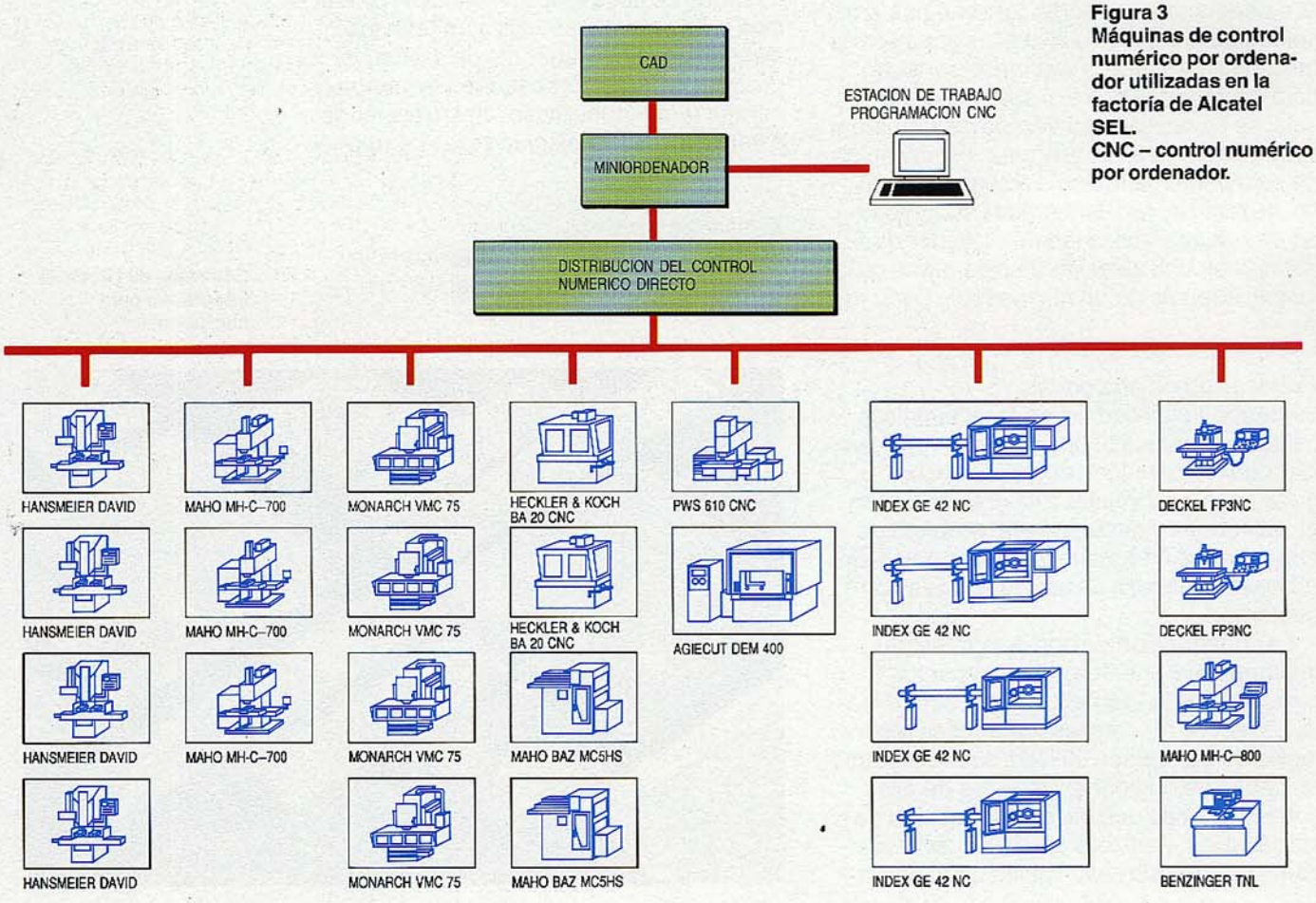
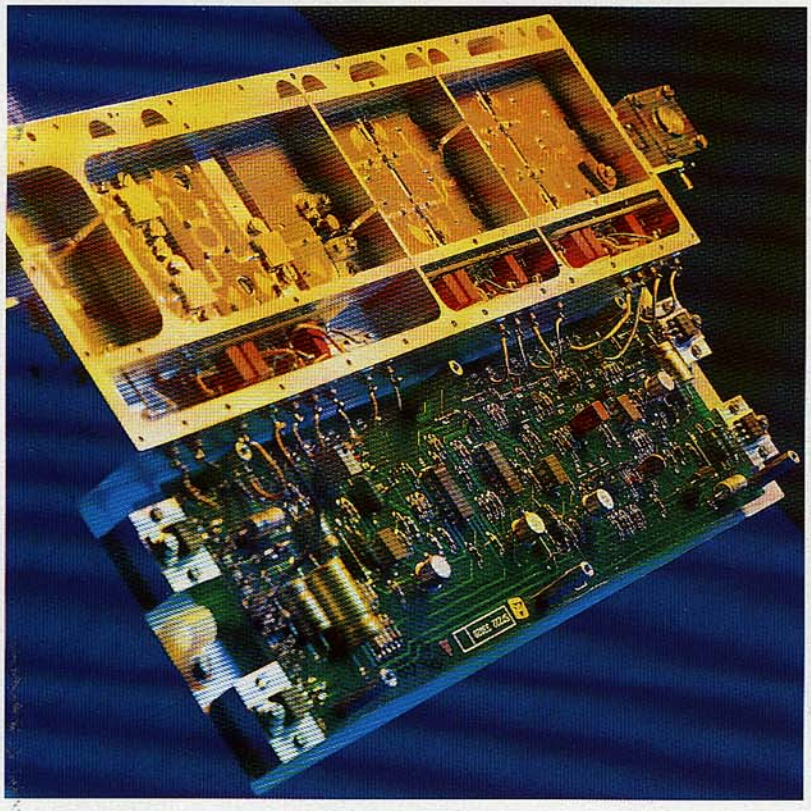


Figura 3
Máquinas de control numérico por ordenador utilizadas en la factoría de Alcatel SEL.
CNC – control numérico por ordenador.



Unidad de microondas completa.

que enchufar las placas en cuadros o armazones, y ello se debe a que las placas de circuito impreso interfuncionan con componentes de microondas de delicado acoplamiento mecánico.

El equipo de pruebas funcionales consta de varios equipos de medida de alta frecuencia controlados por bus CEI. En muchos casos las pruebas funcionales se realizan a la vez que los procesos de ajuste.

La prueba eléctrica final garantiza el funcionamiento sin fallos del producto para el usuario. Las últimas pruebas se realizan con instrumentación controlada por ordenador y equipos automáticos. La programación del ordenador define la secuencia y el tipo de pruebas. Todos los resultados se registran automáticamente de manera que sean accesibles al usuario.

Normalmente las unidades se someten a pruebas dinámicas de temperatura durante las cuales se ejerce continua supervisión de las funciones principales.

Conclusiones

La fabricación de componentes de microondas para sistemas de telecomunicación requiere diversas gamas de tecnología de producción para los componentes eléctricos y mecánicos. Además, como la mayoría de los equipos de microondas se producen en cantidades relativamente pequeñas, los procesos de fabricación deben aportar la flexibilidad necesaria para producir componentes diferentes en pequeñas series. Una gran precisión es importante habida cuenta de las altas frecuencias, y por lo tanto reducidas dimensiones, que se manejan.

Alcatel posee considerable experiencia en el diseño y producción de sistemas de microondas utilizando los clásicos guiaondas y las más recientes técnicas de microcinta. Se sigue coherentemente un enfoque CIM, desde la ingeniería del producto hasta el servicio postventa y la gestión de la calidad. Ello elimina la transferencia "manual" de información entre las diferentes etapas del ciclo de vida de un producto, acelerando su introducción y evitando posibles errores.

Jean-Pierre Chenu nació en París, en 1929. Se graduó en físicas por el Conservatoire National des Arts et Métiers en 1960, trabajando seguidamente en SFR, CSF y Thomson CSF. El Sr. Chenu tiene actualmente a su cargo la fabricación integrada por ordenador y las actividades sobre herramientas y tecnología en Alcatel ATFH.

Gerhard Erdmann nació en Stuttgart, en 1940. Estudió tecnología de fabricación en la Fachhochsschule de Esslingen. Desde 1966, ha trabajado en Alcatel SEL en desarrollo de métodos de producción para fabricar placas impresas y aparatos de radio. En 1978 pasó al área de producción de sistemas de radioenlace, donde ahora es responsable de la tecnología de fabricación.

Helmut Müller nació en Marburg/Lahn en 1948. Tras graduarse en la Escuela Técnica Superior de Darmstadt en 1974, entró en Alcatel SEL donde trabajó en desarrollo de equipo de comunicación de oficinas. En 1982 el Sr. Müller pasó a la sección de ingeniería de pruebas en la planta de Pforzheim, en la cual hoy dirige la ingeniería industrial.

Fabricación del soporte lógico

La fácil adaptación de los sistemas de comunicación modernos a las nuevas exigencias de las redes se apoya en la modularidad y las técnicas de diseño de soporte lógico gobernado por datos. Junto con el crecimiento continuo del volumen de datos cursado por las redes de comunicación, dichas técnicas convierten a la producción de datos para el soporte lógico en una parte importante del ciclo vital del producto. Elementos clave para garantizar datos de alta calidad son los procesos de producción, las herramientas informáticas, la normalización de los datos y la gestión de la configuración.

E. Schatz
Alcatel SEL, Stuttgart, República Federal de Alemania
J. Wauters
Alcatel Bell Telephone, Amberes, Bélgica

Introducción

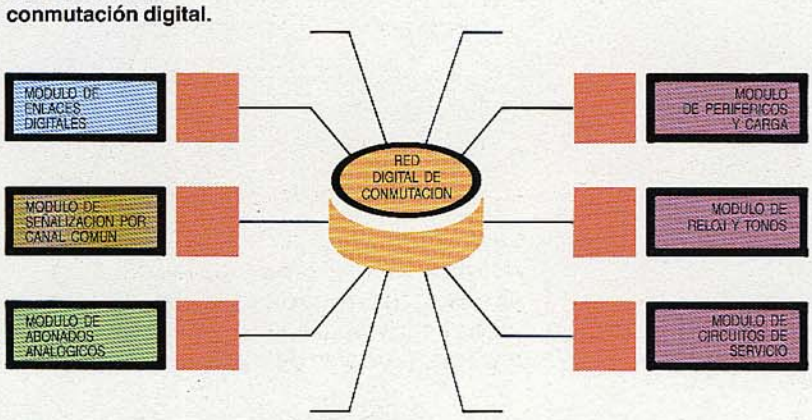
El soporte lógico (conjunto de programas de ordenador) se lleva una parte importante de los costes de desarrollo y fabricación de los sistemas de comunicación controlados por ordenador. El soporte físico se está normalizando para reducir al mínimo los costes del ciclo vital del producto y poder admitir las variantes específicas de cada país, y además se le utiliza con programas estructurados y fáciles de modificar cuyo diseño es modular y el código reutilizable. Esta estrategia, unida al hecho de que los sistemas de conmutación están gobernados por eventos telefónicos, hace que un método de diseño gobernado por datos sea adecuado para el soporte lógico de las comunicaciones. De ahí que los datos tratados por los sistemas digitales de comunicación hayan adquirido gran magnitud y complejidad, pues parte de la inteligencia se ha desplazado del código a los datos. El creciente número de servicios que prestan los modernos sistemas de conmutación digital aviva igualmente la expansión de los datos del soporte lógico, datos que aumentarán todavía más con la introducción de las RDSI y redes inteligentes.

La ingeniería de programación de sistemas de comunicación consta de dos partes principales. En primer lugar, el diseño de todos los componentes del soporte lógico y su integración en un producto genérico que satisfaga los requisitos de un segmento completo del mercado. En segundo lugar, la producción de datos para dicho soporte lógico con el fin de construir una aplicación específica que utilice los elementos genéricos y les añada datos para así crear un sistema capaz de funcionar en la red del usuario. El reto que supone el generar y mantener el creciente volumen de datos de las redes modernas de comunicación, reclama nuevos procesos y herramientas para la fabricación del soporte lógico.

En el pasado, eran los departamentos de desarrollo de programación quienes producían los datos para el soporte lógico. No obstante, Alcatel entiende ahora que esta actividad es más bien de fabricación que de diseño, y por consiguiente aplica a la misma las tácticas de fabricación en serie. Debe recordarse, sin embargo, que la dotación lógica tiene características propias, muy diferentes de las de la dotación física, y por ello se debe encontrar un equilibrio entre las metodologías del soporte lógico y las contrastadas estrategias de fabricación del equipo físico.

Dado el gran volumen de datos a manejar y su influencia en el comportamiento funcio-

Figura 1
Arquitectura básica del Sistema 12 de conmutación digital.



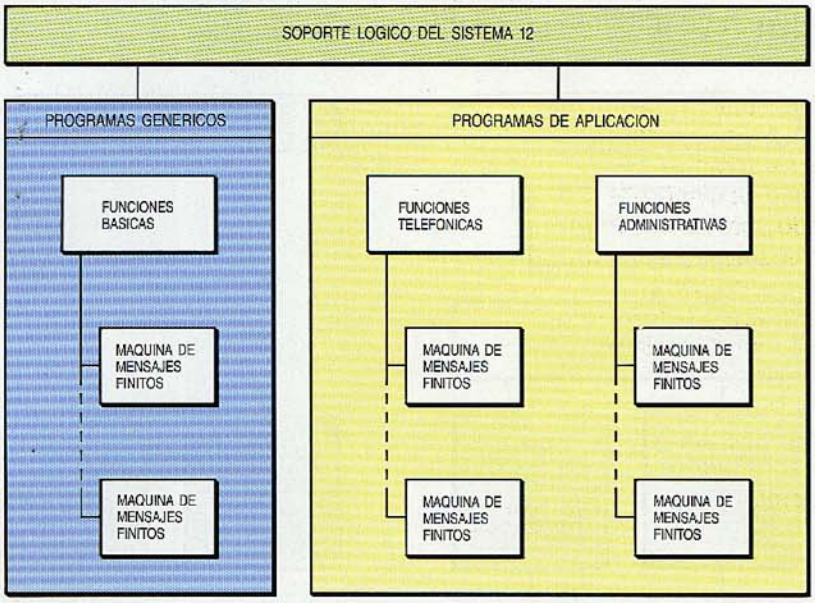


Figura 2
Estructura del soporte lógico del Sistema 12.

nal del sistema, resulta de particular importancia asegurarse de la calidad de los datos. Además, los métodos de producción del soporte lógico deben prever las posibles ampliaciones del equipo y las mejoras de los programas en las centrales ya en servicio.

Arquitectura del soporte lógico Sistema 12

El Sistema 12 es un sistema de conmutación pública digital con control totalmente distribuido, en tanto que el Sistema 12B (Alcatel 5630 BCS) es una gran centralita (PABX) basada en los mismos conceptos de diseño. El núcleo de ambos sistemas es una red digital de conmutación con inteligencia incorporada (Fig. 1), por la cual se envían mensajes entre los procesadores, señales telefónicas y conversaciones digitalizadas. A esta red se conecta un gran número de módulos autónomos, controlados por microprocesador, conteniendo cada uno cuatro componentes básicos: el microprocesador, su memoria, el interfaz con la red digital y los interfaces con los dispositivos periféricos que controla (líneas, enlaces, circuitos de servicio, impresoras, etc.).

El soporte lógico se puede dividir en dos grupos básicos:

- Soporte lógico genérico, que aporta las funciones esenciales del sistema, como el sistema operativo, el sistema de control de la base de datos, las rutinas de entrada/salida y los programas de defensa del sistema.
- Soporte lógico de aplicación, que realiza funciones telefónicas y administrativas, gestión de recursos de enlaces, facilidades de abonado básicas, análisis de prefijos, mediciones, etc.

La arquitectura lógica de los programas se basa en el concepto de máquina de mensajes finitos (FMM, finite message machine). La dotación lógica global se divide en módulos independientes que solamente pueden comunicar entre sí mediante un conjunto limitado de mensajes predefinidos (Fig. 2).

Las funciones de sistema (establecimiento de vía de conversación, señalización de línea, administración de dispositivos) se realizan por acción de las FMM almacenadas en uno o más microprocesadores que intercambian mensajes lógicos. Cada elemento de control se carga con programas (segmento genérico de carga o GLS) y datos asociados (segmento de carga de datos o DLS). Esta arquitectura física distribuida permite producir variantes para distintos países, así como sistemas muy pequeños y grandes centrales interurbanas, utilizando los mismos módulos básicos.

Los datos requeridos por los programas se almacenan en una base de datos relacional que guarda los elementos de información con correlación lógica en una estructura bidimensional denominada *tabla* o *relación*. La naturaleza distribuida del control de las centrales Sistema 12 implica que la base de datos debe asimismo distribuirse entre las memorias de los diversos elementos de control (*relaciones exclusivamente con memoria*) y el disco del sistema (*relaciones exclusivamente con el disco*). Para que el almacenamiento físico y la distribución de los datos sea transparente a los usuarios, la base de datos del Sistema 12 está gestionada por un sistema de control de base de datos DBCS (database control system). Todas las peticiones de acceso a los elementos de información, o de modificación de los mismos se ejecutan mediante llamadas a dicho DBCS.

Fases de ingeniería del sistema

Para la dotación física y lógica de los sistemas de comunicaciones se pueden distinguir tres fases de ingeniería (Fig. 3):

- ingeniería de diseño del sistema genérico
- ingeniería de diseño para clientes, CDE
- ingeniería de aplicación a clientes, CAE.

La *ingeniería de diseño del sistema genérico* no es sino el diseño de los módulos físicos y lógicos que se pueden utilizar en todos los sistemas, sean cuales fueren los requisitos propios de cada país.

Durante la *ingeniería de diseño para clientes*, se prepara al sistema para ajustarse a todas las peculiaridades de la red nacional pertinente. Elementos típicos de la CDE son la señalización interurbana, las facilidades especiales de abonado y la tarificación. De esta fase de diseño se obtienen elementos físicos y lógicos adaptados a un país concreto (*configuración del segmento de mercado*). La parte lógica, denominada *paquete de programas de CDE*, consta de código y de tablas de datos fijos. Todos los elementos del paquete de CDE se utilizan inalterados en todas las centrales de ese país, es decir, durante la producción del soporte lógico se sacan copias directas de los ficheros de CDE, sin proceso alguno por herramientas.

La *ingeniería de aplicación a clientes* aporta toda la información y la documentación necesarias para fabricar, comprobar e instalar una central. Los datos de la central se producen y combinan con el paquete de CDE para generar una cinta de sistema específica de la central, cinta que al ser cargada en la memoria de dicha central hace operacional al sistema.

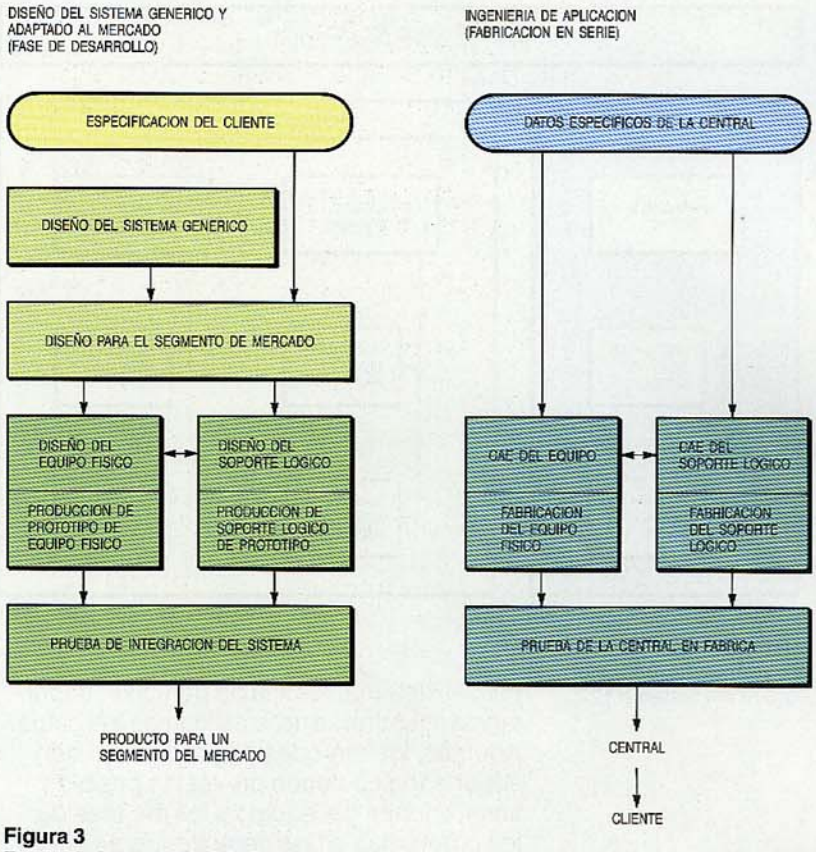


Figura 3
Fases de ingeniería del sistema.

Flujo de un pedido del cliente para fabricación en serie

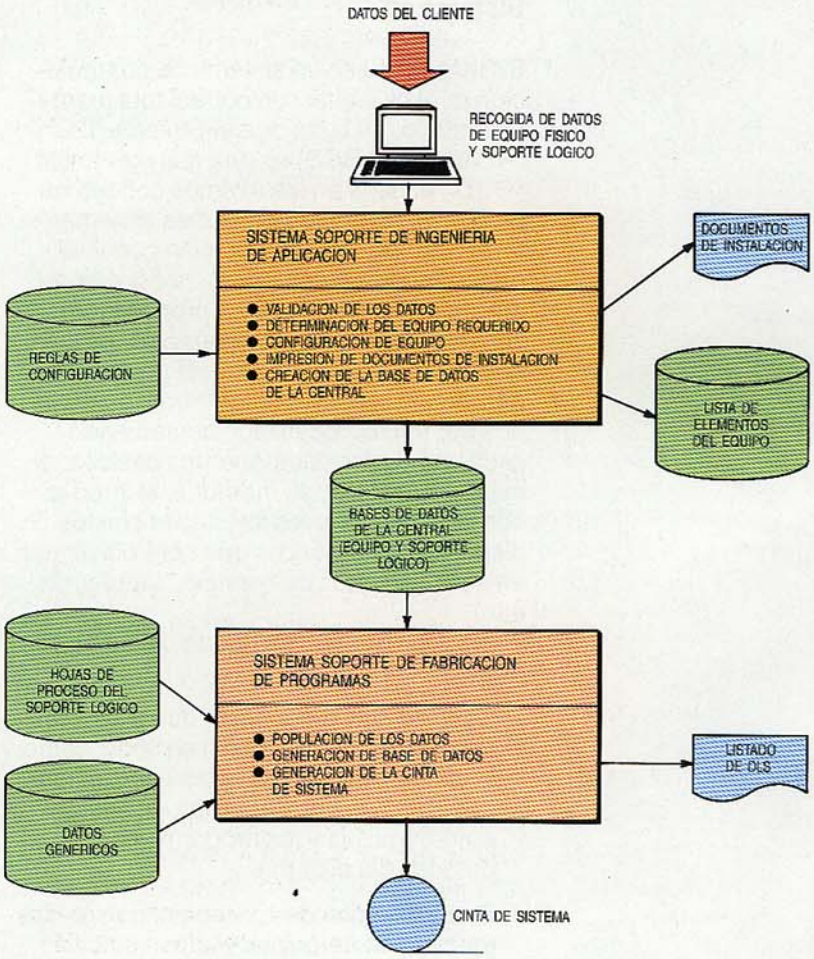
Al examinar con mayor detalle el flujo de información y las acciones a realizar durante la producción de una central específica, se aprecia que para una central Sistema 12, la ingeniería de aplicación se puede dividir en dos fases principales (Fig. 4):

- Determinación de la configuración de equipo físico de la central concreta y tratamiento de los datos telefónicos de entrada del usuario.
- Producción del soporte lógico, o creación de una cinta de sistema para la central particular.

Ambos procesos utilizan técnicas de ingeniería asistidas por ordenador, y están automatizados gracias al *sistema soporte de ingeniería de aplicación* y al *sistema soporte de fabricación de programas*. Estas herramientas de soporte lógico que residen en el ordenador principal, consisten en un gran número de pantallas terminales formatadas y de programas de aplicación.

La central se dimensiona en base a los datos del cliente que especifican el número de líneas y de enlaces requerido, y el tráfico a tratar. En primer lugar, se elige la configuración del segmento de mercado apropiado. En el caso del equipado físico, dicha elección da lugar a una lista de materiales o especificación de tareas que detalla los

Figura 4
Secuencia de órdenes del cliente.



tipos y cantidades de elementos necesarios. Para el soporte lógico, se determina el paquete de CDE a utilizar como entrada para la fabricación del mismo. En el Sistema 12, los equipos se dimensionan al tamaño exacto de la central, en tanto que la dotación lógica se sobredimensiona: sólo una parte de la memoria disponible se popula con elementos de información significativos – el resto tiene valores ficticios. Así podrán realizarse ampliaciones futuras sin reestructurar las memorias en los procesadores, solamente modificando el contenido de los datos.

Durante la CAE del equipo físico se define la distribución exacta de la central, lo que da lugar a documentos de instalación tales como distribución de los bastidores, especificaciones del cableado y la distribución de energía. Al planificar la fabricación de tal equipo se realiza un nuevo análisis descendente de la lista de elementos generada con el fin de definir y programar los pedidos y la fabricación de todas las piezas.

Cuando se ha completado la fase de CAE del equipo y la validación de la introducción de datos telefónicos, toda la información sobre dotación física y lógica se suministra a las bases de datos CAE de la central para un nuevo proceso por la fabricación del soporte lógico. Esta entrada se utiliza luego para producir los segmentos de carga de datos. Los ficheros de datos se copian seguidamente en una cinta de sistema junto con los programas del Sistema 12, la cual cinta se comprueba sobre los equipos de la central montados en la fábrica (prueba de la central integrada en fábrica). Se envía así al lugar de instalación una central totalmente probada e integrada, con lo que se reducen al mínimo los costes de instalación y la duración de la misma. Una vez realizadas *in situ* las pruebas básicas de sistemas, la central se entrega y puede ser integrada en la red.

Procesos de fabricación del soporte lógico

La producción del soporte lógico incluye todas las actividades necesarias para generar la cinta de sistema de una central determinada, cinta que contiene el código ejecutable y todos los datos necesarios para que esa central pueda operar en su red nacional del modo especificado. Dicha producción consta de dos fases principales:

- Creación de una configuración o paquete CDE para el segmento de mercado. Esta tarea, que sólo ha de realizarse una vez para un mercado concreto, se denomina producción del soporte lógico de CDE.
- Fabricación de datos, que ha de hacerse para cada central.

Es el departamento de diseño de soporte lógico quien desarrolla y prueba el paquete de programas de CDE, entregándolo después al grupo de fabricación de dicho soporte lógico.

Procesos de producción del soporte lógico de CDE

La mayoría de los programas están escritos en CHILL, lenguaje de alto nivel del CCITT desarrollado para aplicaciones de telecomunicación, excepto los que afectan a unas pocas funciones críticas en el tiempo como el *núcleo del sistema operativo* y los controladores de los dispositivos físicos, codificados en ensamblador. Las sentencias MULTIPOL quedan intercaladas en el código fuente CHILL. MULTIPOL es un lenguaje de uso múltiple, orientado a problemas, que se utiliza en el Sistema 12 y en el Sistema 12B para que los programadores puedan definir procesos de *máquinas de mensajes finitos*, y para hacer llamadas al sistema operativo y al sistema de gestión de la base de datos. Una vez compilados y validados los módulos mediante una prueba de módulo y/o una lectura de código, el programador entrega sus módulos al departamento de control de configuración. Este hecho marca el final del diseño y codificación del soporte lógico y el inicio de su producción.

El grupo de producción de soporte lógico utiliza bibliotecas de control de configuración para construir la primera de las centrales. Ante todo, las fuentes son procesadas previamente por el preprocesador MULTIPOL, el cual convierte en CHILL puro todas las sentencias del lenguaje orientado a problemas del Sistema 12, utilizando para ello las definiciones de módulo y mensaje almacenadas en la biblioteca de descripción de componentes de la dotación lógica, y los datos y definiciones de modo de la metabase de datos (Fig. 5). Después se ejecuta el compilador CHILL, seguido del ensamblador para convertir las fuentes en formato objeto reasignable. Todas estas etapas forman un proceso de producción en el ordenador central cuya salida es un único fichero objeto denominado *módulo genérico del sistema*, bloque constitutivo básico de los paquetes de programas del Sistema 12.

El proceso siguiente de producción del soporte lógico es el *ubicador de segmentos*, cuya salida es un fichero de carga absoluto llamado *segmento genérico de carga* (GLS). Durante la construcción del GLS se definen la dirección inicial y la zona de memoria para el área de datos (DLS). El

DLS se produce más tarde, durante la fabricación del soporte lógico de la central, realizándose in situ la fusión de los datos en el GLS durante la carga de un procesador. En el entorno de producción, los GLS y DLS son ficheros independientes.

Fabricación de datos

La fabricación de los datos de la central implica cuatro tareas principales: la CAE del soporte lógico, la población de datos, la generación de la base de datos o construcción del segmento de carga de datos, y la generación de la cinta de sistema.

Se ha definido un cuestionario de CAE para recoger los requisitos del cliente respecto a una central concreta. Dicho cuestionario contiene, por ejemplo, los números de guía de los abonados, su clase de servicio y otras características, junto con detalles sobre el entorno de la red, enlaces conectados, información de rutas interurbanas, etc. Esta descripción formal y de alto nivel de los datos telefónicos se valida primero y luego se convierte a la base de datos CAE de la central, la cual proporciona una descripción de nivel inferior, más orientada al Sistema 12, de los datos de entrada del cliente.

A partir de esta base de datos CAE de la central, que también contiene la configuración de equipo de la misma, se generan automáticamente todas las tablas para la base de datos relacional del Sistema 12 (Fig. 6). La ubicación de los valores de los datos en direcciones de memoria, la distribución de los datos entre los microprocesadores y la creación de todas las tablas de control y los directorios de la base de datos, las realiza el programa generador de la base de datos; este programa produce los segmentos de carga de datos que contienen la imagen en memoria absoluta de los datos de la central, tal y como pueden ser leídos por el código del soporte lógico.

Finalmente, el constructor del sistema combina los programas y ficheros de datos, y copia en cinta magnética (la cinta de sistema) todos los ficheros a cargar en el disco del Sistema 12. El soporte lógico del Sistema 12 puede generar, a petición del explotador de la central, una copia de seguridad en cinta con ese mismo formato. A efectos de seguridad, se generan periódicamente estas copias con el fin de poder recargar los ficheros en el caso improbable de fallo del disco. Dicha cinta también sirve para recargar los datos de la central en el entorno de fabricación con miras a rehacer trabajos, mejorar el soporte lógico, etc.

Los procesos de fabricación están controlados por menús. Los únicos parámetros a suministrar son la identidad de la central y el número de serie de la cinta en la que hay que escribir. La identidad de la central señala a una *hoja de proceso del soporte lógico* o fichero de órdenes, la cual define todos los ficheros de entrada y las versiones de las herramientas de ayuda a utilizar durante la producción. Este sistema de fabricación informatizado, denominado *sistema soporte de fabricación de soporte lógico del Sistema 12*, se ejecuta en un ordenador central. No obstante, en el futuro, algunas partes del proceso podrán ejecutarse en ordenadores o estaciones de trabajo personales.

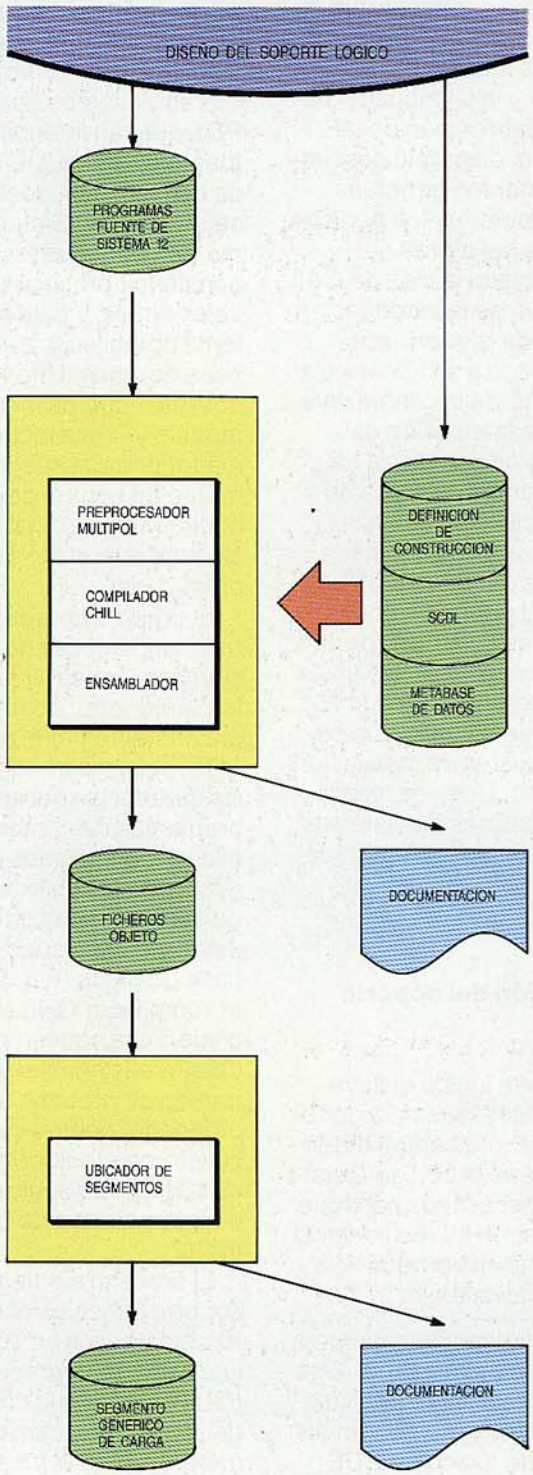


Figura 5
Producción de soporte lógico de CDE.
SCDL – biblioteca de descripción de componentes lógicos.

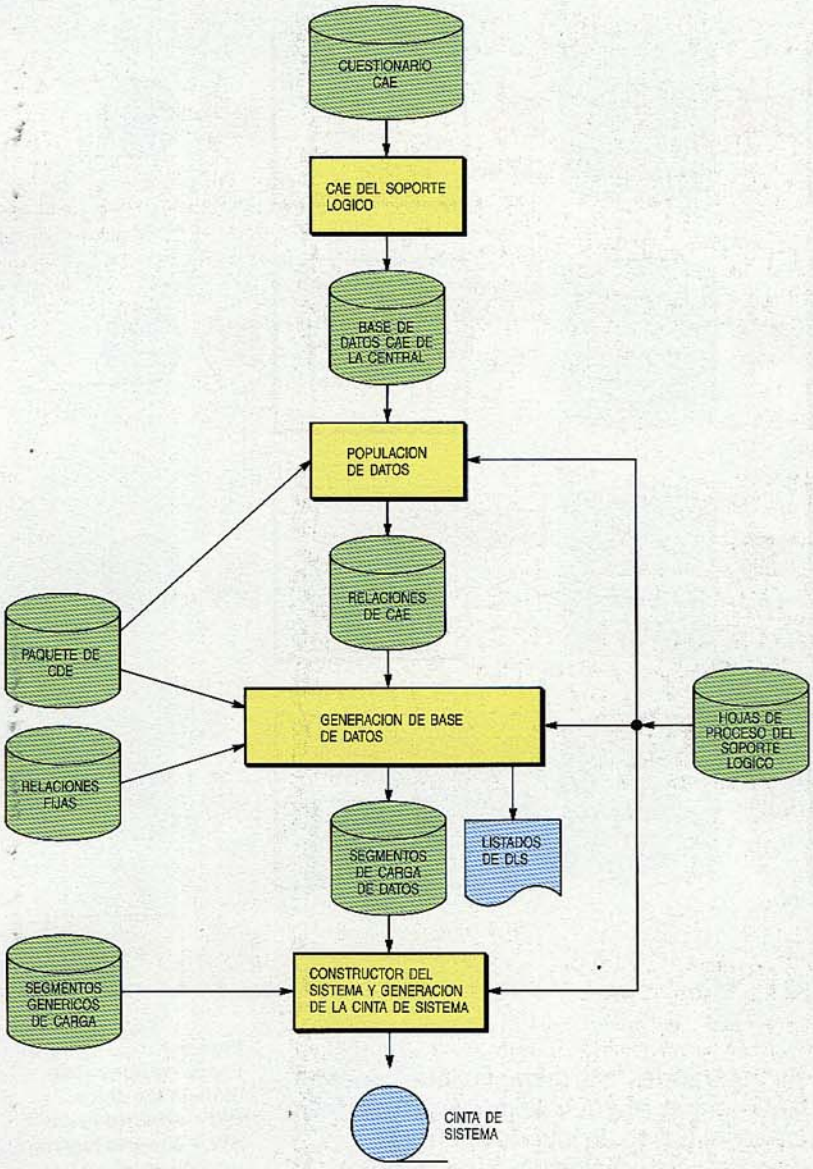


Figura 6
Procesos de fabricación del soporte lógico.

Aseguramiento de calidad en la fabricación del soporte lógico

La producción de las primeras centrales Sistema 12 trajo a un primer plano la calidad de los datos. Se reconoció que los datos de baja calidad podían elevar de modo inaceptable los costes de instalación y pruebas in situ del soporte lógico. En consecuencia, todas las compañías Alcatel iniciaron programas de aseguramiento de la calidad de los datos, tanto para mejorar los procesos de producción como para reducir los costes de fabricación en serie e instalación del soporte lógico en la explotación real.

Los elementos más importantes que contribuyeron a asegurar la calidad de los datos en el Sistema 12 eran:

- la calidad del diseño del producto
- la maestría de los ingenieros
- los procedimientos de realimentación desde los lugares de prueba e instalación al de fabricación
- la normalización de los datos
- la automatización de los procesos de construcción
- la estabilidad del proceso
- el control de la configuración.

Los tres primeros puntos no requieren muchas aclaraciones. Cuando subsisten problemas en el diseño del producto, resulta costoso probar la salida de una línea de producción masiva e instalar el sistema en su lugar real. Por tanto, en paralelo con las acciones que aseguraban la calidad de los datos en lo que a fabricación se refiere, se tomaron medidas para garantizar la calidad del diseño del soporte lógico.

Los recursos humanos juegan siempre un papel importante. En el diseño del soporte lógico, la productividad de un buen programador puede ser cinco veces la de un programador mediano. La experiencia enseña que al fin resulta rentable contar con buenos ingenieros de programación, muy experimentados en telecomunicaciones, para la producción del soporte lógico. Se eliminan así fallos en el comienzo de la línea de producción del soporte lógico, cuando las correcciones todavía son relativamente sencillas, evitándose un gran número de lentas correcciones en el lugar de la instalación.

Debe reconocerse que, dada la multitud de diferentes estados de un sistema de soporte lógico, la prueba del mismo nunca puede ser tan completa como la del equipado físico. Por ello, unos mecanismos de realimentación rápidos y eficientes son de especial importancia para asegurar la calidad del soporte lógico. La gran eficacia en el análisis de problemas hace que se logren los objetivos de calidad antes de haber entregado grandes cantidades al cliente, con lo que se reduce el número de costosas mejoras del soporte lógico en las centrales ya en servicio. Además, es esencial un análisis detallado de los informes de fallos. En vez de realizar una reparación fácil y rápida, todo fallo debe comprenderse enteramente y corregirse su causa fundamental.

La automatización y la normalización del proceso guardan estrecha relación. Como ya se mencionó, la fabricación del soporte lógico implica dos importantes tareas:

- CAE del soporte lógico asistida por ordenador
- proceso de construcción del soporte lógico, consistente en generación de datos, producción del segmento de carga de datos y generación de la cinta de sistema.

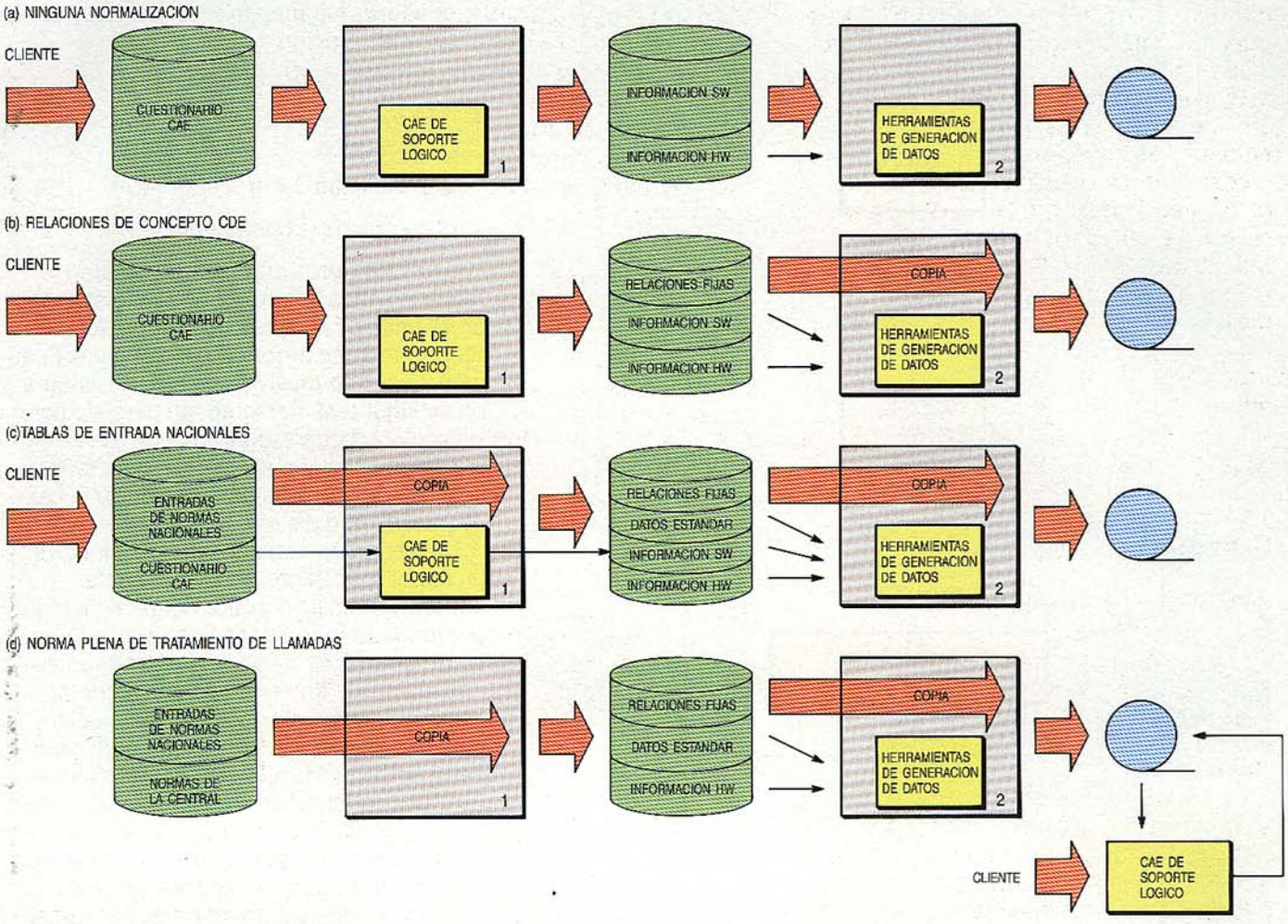


Figura 7
Fases de normalización de los datos.
HW – soporte físico
SW – soporte lógico.

Suponiendo que el nivel óptimo de calidad sea uno, la calidad total de la salida será el producto de los niveles de calidad de estas dos tareas: $Q_T = Q_1 \times Q_2$. Una buena política de aseguramiento de calidad debe optimizar este producto en vez de limitarse a hacerlo en uno de los factores. Por consiguiente, ni la automatización ni la normalización del proceso pueden conseguir una calidad óptima por sí solas. Q_2 se optimiza mediante la automatización: la táctica es utilizar herramientas para generar todos los datos de CAE, y reducir al mínimo la intervención del operador.

Q_1 se optimiza por normalización. El primer paso para normalizar los datos fue la introducción de la noción de datos de CDE (Fig. 7b). Los algoritmos de población de datos se definen de tal forma que muchas de las tablas de datos sean comunes para un mercado particular. Estas relaciones de CDE se preparan luego por una sola vez, y se copian simplemente (sin proceso alguno) durante la construcción de la central, con lo que desaparece todo riesgo de errores.

El segundo paso fue dividir las entradas para la generación de las restantes relaciones de CAE en una parte (grande) nacional fija y una parte (más pequeña) que depende de la central. Aunque se procesan todas las tablas, el riesgo de introducir errores durante la fabricación del soporte lógico queda limitado a las tablas de la central, ya que las entradas relativas a normas nacionales se han hecho de una vez para todas las centrales (Fig. 7c).

El objetivo es eliminar todas las entradas de CAE y producir cintas totalmente estándar. Los datos dependientes de la central se introducen justamente antes de la entrega, utilizando para ello las órdenes de operaciones y mantenimiento del sistema (Fig. 7d).

Otro aspecto del aseguramiento de la calidad es la estabilización de los procesos de producción. Es preferible utilizar una línea de producción (procedimientos de construcción) estable y la misma versión de las herramientas de producción en tantas centrales como sea posible. Cuando se requiere mejorar una herramienta para corregir fallos o introducir nuevas facilidades, el proceso actualizado sólo se lanza para la producción en serie tras haber comprobado exhaustivamente las primeras cintas obtenidas con las nuevas herramientas.

Por último, aunque no sean de menor importancia, se encuentran los procedi-

mientos de control para gestión de la configuración. Todos los procesos de construcción se dirigen a través de hojas de proceso de soporte lógico que definen todos los parámetros variables, los ficheros de entrada y las herramientas necesarias para procesarlos. Ha de conocerse la exacta configuración del soporte lógico de una central para ayudar al análisis de los informes de fallo del cliente, distribuir las correcciones a los sistemas en servicio y realizar mejoras en dicho soporte lógico. Los procedimientos de gestión de configuración hacen posible traspasar la corrección de los errores de una central determinada a todas las centrales que utilizan el mismo paquete de programas.

Conclusiones

Actualmente, la producción de soporte lógico es parte integrante de la fabricación de sistemas de conmutación digital. Al crecer todavía más el volumen y complejidad de los datos del soporte lógico, esta nueva disciplina cobrará cada vez mayor importancia.

Con la fabricación del soporte lógico de las centrales digitales públicas y privadas Sistema 12, Alcatel ha acumulado un notable saber-hacer en este campo. Esto no solamente sustenta los actuales programas de entrega, sino que además asegura la producción de datos de alta calidad y bajo coste para los nuevos productos de telecomunicación de Alcatel (redes inteligentes, radiotelefonía celular móvil, RDSI de banda ancha, etc.), apoyada en avanzados procesos y herramientas de fabricación de soporte lógico.

Eberhard Schatz nació en Stuttgart, Alemania, en 1940. Estudió ingeniería eléctrica en la Universidad Técnica de Aquisgrán, donde se graduó Dipl. Ing. En 1968 entró en Alcatel SEL como ingeniero de desarrollo. Tras ocupar diversos puestos en el departamento de diseño del Business Systems Group, se hizo cargo de la ingeniería de calidad. Posteriormente fue nombrado director de calidad de la planta de Gunzenhausen, en la que se incluía la dirección del proyecto de factoría para el Sistema 12B. En 1987 asumió la función de operaciones centrales, en Stuttgart, y dos años después pasó a ser responsable de la ingeniería industrial.

Jef Wauters nació en Lier, Bélgica, en 1950. Se graduó en ingeniería eléctronica en la Universidad de Gante, en 1974, obteniendo el MS en informática al año siguiente. Entró en Alcatel Bell Telephone en 1976, como diseñador de herramientas de ayuda al soporte lógico para el Metaconta 10C* y, posteriormente, para el Sistema 12. Como jefe del equipo de soporte a herramientas de usuario, participó en la instalación de los sistemas de producción de soporte lógico de la Bell en Corea, Australia y México. En 1984, el Sr. Wauters fue nombrado responsable de la producción del soporte lógico de los modelos de ingeniería y de centrales prototipo. Desde 1988 es jefe del departamento de fabricación de soporte lógico.

* Marca registrada del Grupo Alcatel.

Fabricación de fibras ópticas para sistemas de telecomunicación

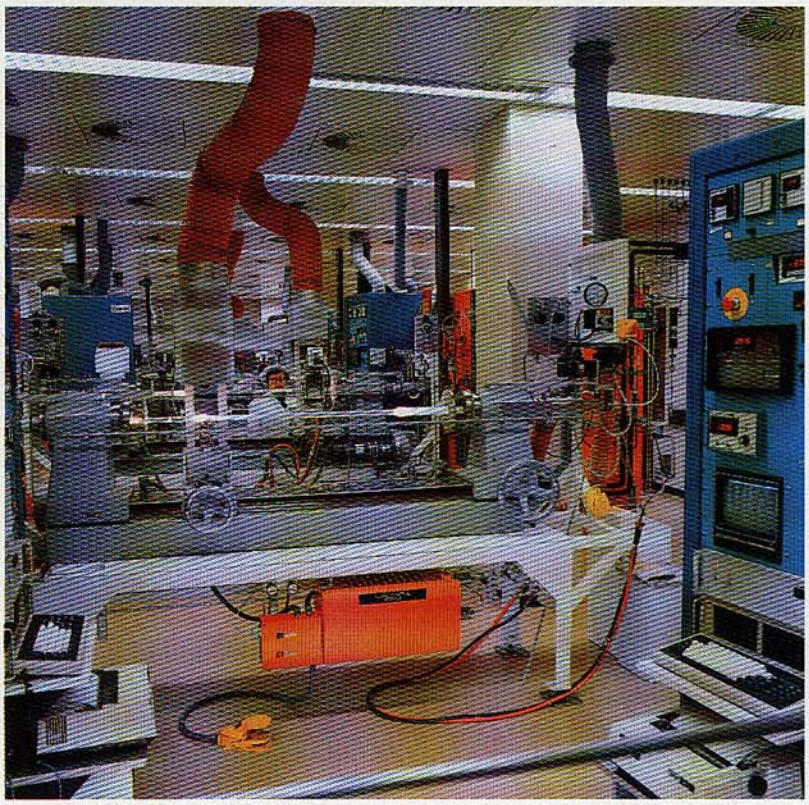
Las fibras ópticas cobran cada vez mayor importancia en las redes de telecomunicación por su gran capacidad de transmisión y su inmunidad a las interferencias. Sin embargo, se necesitan unas técnicas de fabricación muy precisas para garantizar que las fibras terminadas posean tales características.

W. Kiesewetter
Alcatel SEL, Stuttgart, República Federal de Alemania

Introducción

Los cables de cobre para telecomunicación van siendo reemplazados en todo el mundo por cables de fibra óptica debido a la demostrada superioridad de estos últimos. A título de ejemplo, un sistema de 2,4 Gbit/s sobre una fibra monomodo puede transmitir más de 30000 llamadas simultáneamente. Sin embargo, para alcanzar esta gran capacidad de transmisión se requieren materiales de la mayor pureza, así como un proceso y un entorno de producción extremadamente limpios.

Proceso MCVD para producción de preformas de fibra óptica dispuestas para el entubado.



Todas las fibras ópticas se fabrican en zonas limpias, en las cuales todo el personal de producción debe vestir prendas especiales para evitar la contaminación de las fibras con partículas procedentes del cuerpo humano. La atmósfera de una oficina normal contiene 700000 partículas de polvo por pie cúbico, de diámetro entre 0,5 µm y 5 µm, y en cambio en una sala limpia destinada a producción de fibras ópticas ese valor se reduce a 10000, aproximadamente igual a lo exigido en el quirófano de un hospital. En ciertas zonas, como en la proximidad de la fibra desnuda en la torre de estirado, no hay más de 100 partículas por pie cúbico.

Fabricación de preformas

El proceso completo de fabricación de una preforma está sometido al control automático de un ordenador personal. La fabricación de la preforma comienza cuando se carga en el procesador el programa de producción.

Los materiales de partida para la producción de fibras ópticas por el proceso MCVD (deposición química en fase de vapor modificada) son un tubo de cuarzo muy puro y los productos químicos $SiCl_4$, $GeCl_4$ y $POCl_3$ (en estado líquido), debiendo todos ellos presentar sólo ínfimos indicios de impurezas. El objeto de la primera etapa de fabricación de la fibra óptica es depositar varias capas delgadas de vidrio sintético en la superficie interior del tubo de cuarzo, y luego colapsar dicho tubo para formar una barra de vidrio con índice de refracción variable, que es la preforma. Con este fin, el tubo de cuarzo se fija al cabezal y al contrapunto de un torno de trabajar vidrio, similar a un torno para metales pero diferenciado

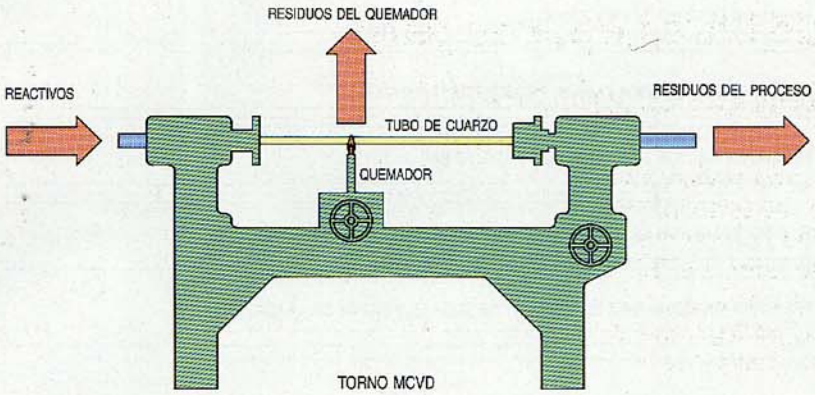


Figura 1
Esquema del proceso MCVD.

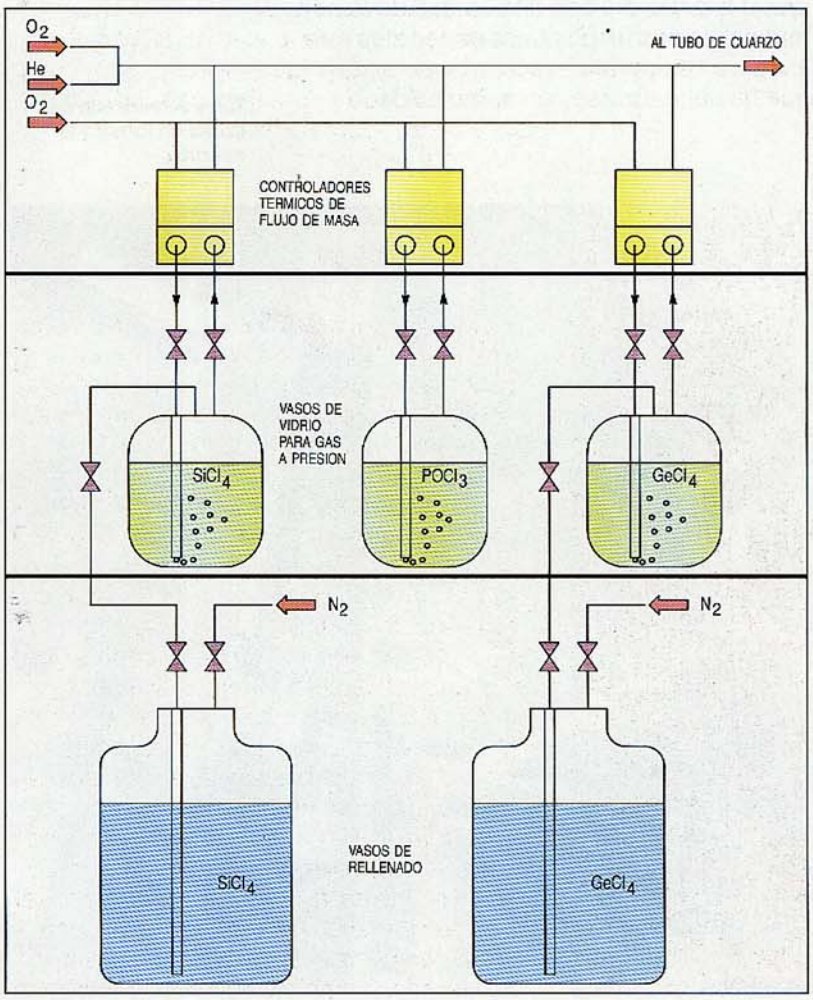
principalmente por llevar en el soporte un quemador oxhídrico (Fig. 1).

Quemador oxhídrico
El quemador oxhídrico comprende seis cabezales desplazables con siete boquillas cada uno dispuestas paralelamente al tubo de cuarzo, o bien un quemador semicircular con unas 80 boquillas. El primer tipo de quemador produce una llama afilada muy adecuada para el colapsado del tubo en la producción de la preforma, mientras que el segundo tipo caldea una zona más amplia y por ello es apropiado para el proceso de deposición. Ambos quemadores alcanzan una temperatura de 2400 °C.

Estación de vapores
La preparación y mezcla de productos químicos en estado gaseoso se realiza en la estación de vapores, que consta de tres etapas como muestra la figura 2. La etapa inferior contiene unos vasos rellenables para $SiCl_4$ y $GeCl_4$, en la intermedia hay unos vasos de vidrio donde borbotean gases a presión, y en la etapa superior unos controladores térmicos de flujo regulan con precisión la composición de la mezcla de gases inyectada en el tubo de cuarzo para producir la preforma. Las etapas segunda y tercera de la estación de vapores se mantienen a una temperatura constante de 35 °C ± 0,1 °C.

El oxígeno, que actúa como portador, se pasa simultáneamente por los tres recipientes de borboteo, produciendo mezclas gaseosas de oxígeno con cada uno de los tres compuestos químicos. Dichas mezclas gaseosas se combinan luego, y la mezcla resultante se diluye con oxígeno y helio de alta pureza para mejorar así la transferencia térmica.

Figura 2
Esquema de la estación de vapores que produce la mezcla de gases, controlada con precisión, necesaria para fabricar las preformas.



Proceso de deposición
La mezcla gaseosa, cuidadosamente controlada, de $SiCl_4$, $GeCl_4$, $POCl_3$, oxígeno y helio producida en la estación de vapores, se hace circular continuamente por el tubo de cuarzo montado en el torno para vidrios. El quemador oxhídrico hace que se deposite una capa de vidrio sintético en la superficie interior del tubo, dependiendo el número de capas de envoltura y de núcleo depositadas del perfil de índice de refracción requerido. Se depositan primero las de envoltura, que no solamente ayudan a guiar la luz por el núcleo de la fibra sino que además impiden la difusión de iones OH desde el tubo de vidrio lo cual aumentaría la atenuación de la fibra. Cuando se han depositado todas las capas de la envoltura se procede a hacerlo con las del núcleo, que propagan la luz por la fibra.

Para aumentar el índice de refracción de la fibra, se incrementa notablemente desde la envoltura hacia el núcleo la proporción de $GeCl_4$ en la mezcla. Durante esta fase del proceso es importante mantener una temperatura constante de 2150 °C en el centro de la zona calentada y un perfil de temperaturas determinado en la superficie del tubo sustrato. El perfil de temperatura depende de la estructura y estado del quemador (revestimiento, geometría, boquillas). Para conseguir la menor atenuación posible, la relación de diámetros núcleo/envoltura debe ser del orden de 1:6.

Tras la deposición y enderezado del tubo sustrato, se le colapsa para obtener una preforma.

Proceso de colapsado
Durante el colapsado, la temperatura del quemador oxhídrico se eleva hasta 2400 °C y se reduce apreciablemente la velocidad a la que recorre el exterior del tubo. Al reblandecerse el vidrio la tensión superficial hace que el tubo se colapse, produciendo una barra maciza (la preforma). En esta fase sólo se inyectan en el tubo oxígeno y cloro de la máxima pureza, sirviendo el cloro para absorber los iones OH y así mejorar las características de atenuación de la fibra.

Proceso de entubado

Es económicamente ventajoso aumentar la longitud de fibra que puede obtenerse de una preforma. No obstante, si ha de mantenerse la relación de diámetros núcleo/envoltura en 1:6, se necesitarían preformas voluminosas y tubos de pared gruesa, y además la baja conductividad del vidrio al calor impediría utilizar un proceso térmico para depositar las necesarias capas de vidrio en el interior del tubo. En consecuencia, se ha elaborado un proceso de entubado para la fabricación de preformas más largas: frente a los 15 km que aproximadamente se obtienen por estirado de una preforma normal, una preforma entubada llega a producir de 30 a 50 km de fibra óptica.

En el proceso con entubado, las capas de núcleo y de envoltura se depositan también por el método MCVD, pero la diferencia consiste en utilizar un tubo de pared delgada donde se depositan más capas que en una preforma normal destinada a un proceso sin entubado. Tras la deposición, este tubo delgado se colapsa para obtener una preforma, y ésta se coloca después en el interior de un *entubador*, que es un tubo con diámetro interior ligeramente superior al diámetro de la preforma. Seguidamente se funden juntos dichos tubo y preforma, formando así una envoltura más gruesa y obteniendo la relación 1:6 requerida entre los diámetros del núcleo y la envoltura. El tubo entubador se elige de modo que proporcione el deseado perfil de índice de refracción de núcleo/envoltura en la preforma terminada.

Para el proceso de entubado se utiliza un torno de trabajar vidrio equipado con quemador oxhídrico. Este torno ha de ser de gran solidez y precisión para absorber las fuerzas originadas durante el alineamiento exacto de la preforma, con objeto de evitar todo cambio en la velocidad de rotación y toda desviación de un movimiento perfectamente circular que pudiera causar excentricidad del núcleo en la fibra finalmente obtenida.

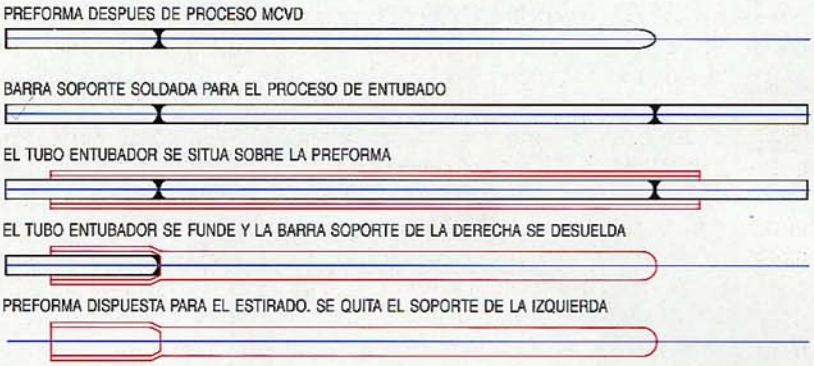
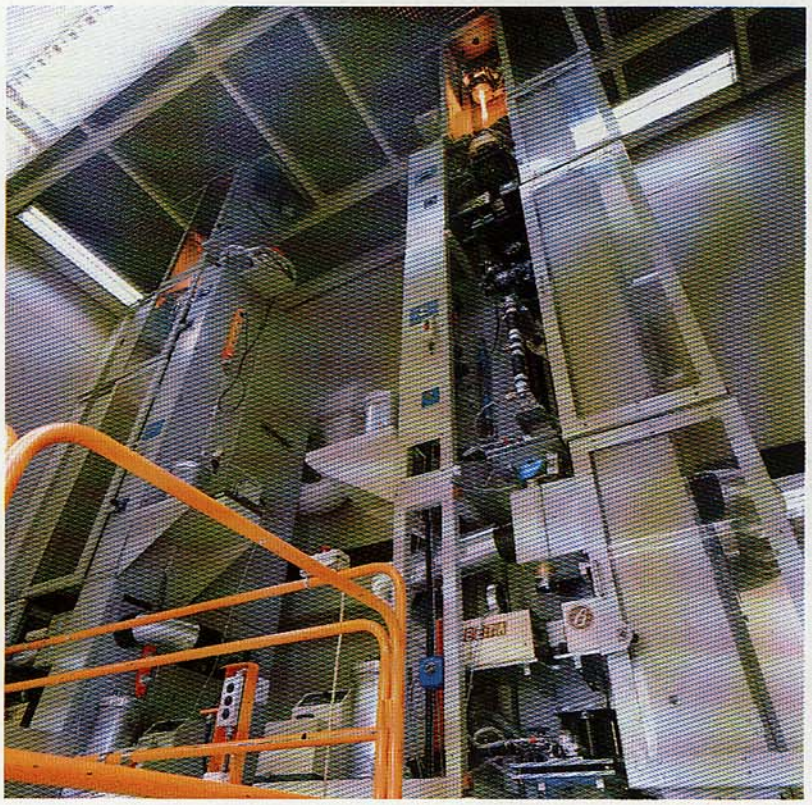


Figura 3
Etapas del proceso de entubado.

En Alcatel SEL se utiliza un proceso de entubado horizontal en lugar del proceso vertical, más usual; ello simplifica la preparación y el manejo de preformas y tubos entubadores, consiguiendo además valores muy bajos de excentricidad. El proceso de entubado se muestra en la figura 3: la preforma obtenida por proceso MCVD se monta en el cabezal del torno de entubado, luego se monta una barra soporte en el contrapunto del mismo torno y se suelda por fusión a la preforma. A continuación se ajusta la preforma con una unidad de fusión manual y unos dispositivos especiales que aseguren su perfecta rectitud, operación que ha de realizarse con sumo cuidado

Torre de estirado de fibras en funcionamiento.



para eliminar toda excentricidad del núcleo en las fibras obtenidas de la preforma, que impediría su utilización en sistemas de telecomunicación.

La preforma se limpia pasando una llama sobre su superficie. Al mismo tiempo se trata con freon la superficie interna del tubo sustrato para quitar impurezas, mejorando así la resistencia a la rotura de las fibras obtenidas de esta preforma. El tubo entubador una vez limpio se lleva sobre la preforma, fijándolo en posición concéntrica, y se suelda a la misma cerca de la barra soporte. La preforma original y el tubo se funden entonces, obteniéndose una preforma entubada. Durante la fusión se rarifica el espacio existente entre preforma y barra, con el fin de que la presión exterior actúe sobre el tubo juntando las dos partes y así se abrevie el proceso.

Tras el entubado se inspecciona la preforma para descubrir posibles burbujas y otros defectos, y además se calcula la longitud teórica de la fibra a obtener.

El quemador utilizado en el torno de entubado tiene boquillas de cristal de cuarzo, lo que evita el deterioro del quemador a 2100 °C y asegura la ausencia de contaminación en la superficie de la preforma. Es posible pues fabricar fibras con tensión de rotura superior a 18 N.

Proceso de estrechamiento

En el mercado se encuentran tubos para entubar con diversas dimensiones. Aunque en principio habría que utilizar un tubo a la medida exacta de cada preforma, ello no resulta práctico. En la mayoría de los casos el diámetro exterior de la preforma permite utilizar uno de los tubos estándar, pero en las raras ocasiones en que el ajuste entre preforma y tubo no es satisfactorio, tales preformas en vez de desecharse pueden estrecharse ligeramente, reduciendo su diámetro para adaptarlo al tubo disponible que más se le aproxime.

Estirado de la fibra

La transformación de la preforma en fibra se realiza en una torre de estirado. Para ello se fija la preforma en una mordaza situada en lo alto de la torre y luego se la hace descender hacia el interior del horno de modo que su extremo inferior caiga precisamente bajo el centro de dicho horno, donde se alcanza la temperatura máxima de 2200 °C (Fig. 4). Esta temperatura reblandece la preforma de tal modo que el peso del extremo inferior va haciendo salir lentamente la fibra estirada.

Para iniciar el proceso de estirado el extremo inferior de la fibra se corta aproximadamente a 1 m por debajo del horno, se pasa por un tubo de refrigeración por helio y se estira manualmente hasta un diámetro de unas 100 µm. Seguidamente la fibra pasa por una polea auxiliar para ser luego enfilada a través de un primer dispositivo de recubrimiento, una unidad de curado por ultravioletas, un segundo dispositivo de recubrimiento y finalmente varias unidades más de curado. La polea conduce la fibra a un mecanismo tensor que amortigua oscilaciones mecánicas a lo largo de toda la fibra. Por último la fibra se enrolla en una bobina de estirado[1].

Una vez conducida la fibra a través de la torre de la forma descrita, el estirado se inicia automáticamente, aumentando gradualmente su velocidad. Un sistema de medición del diámetro situado entre el

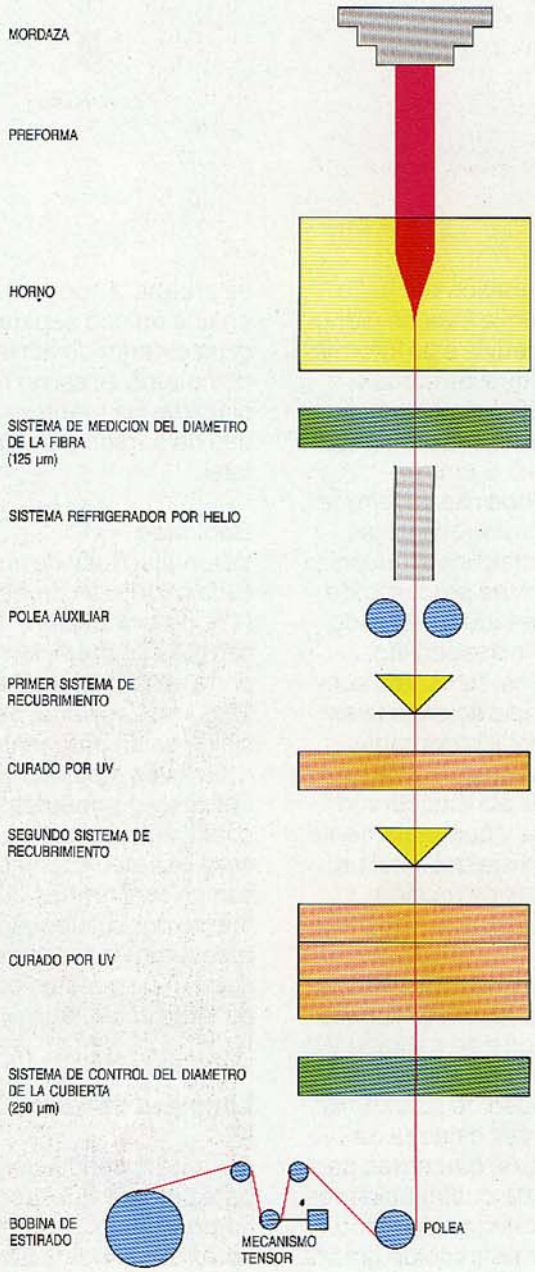


Figura 4
Torre de estirado de fibra.

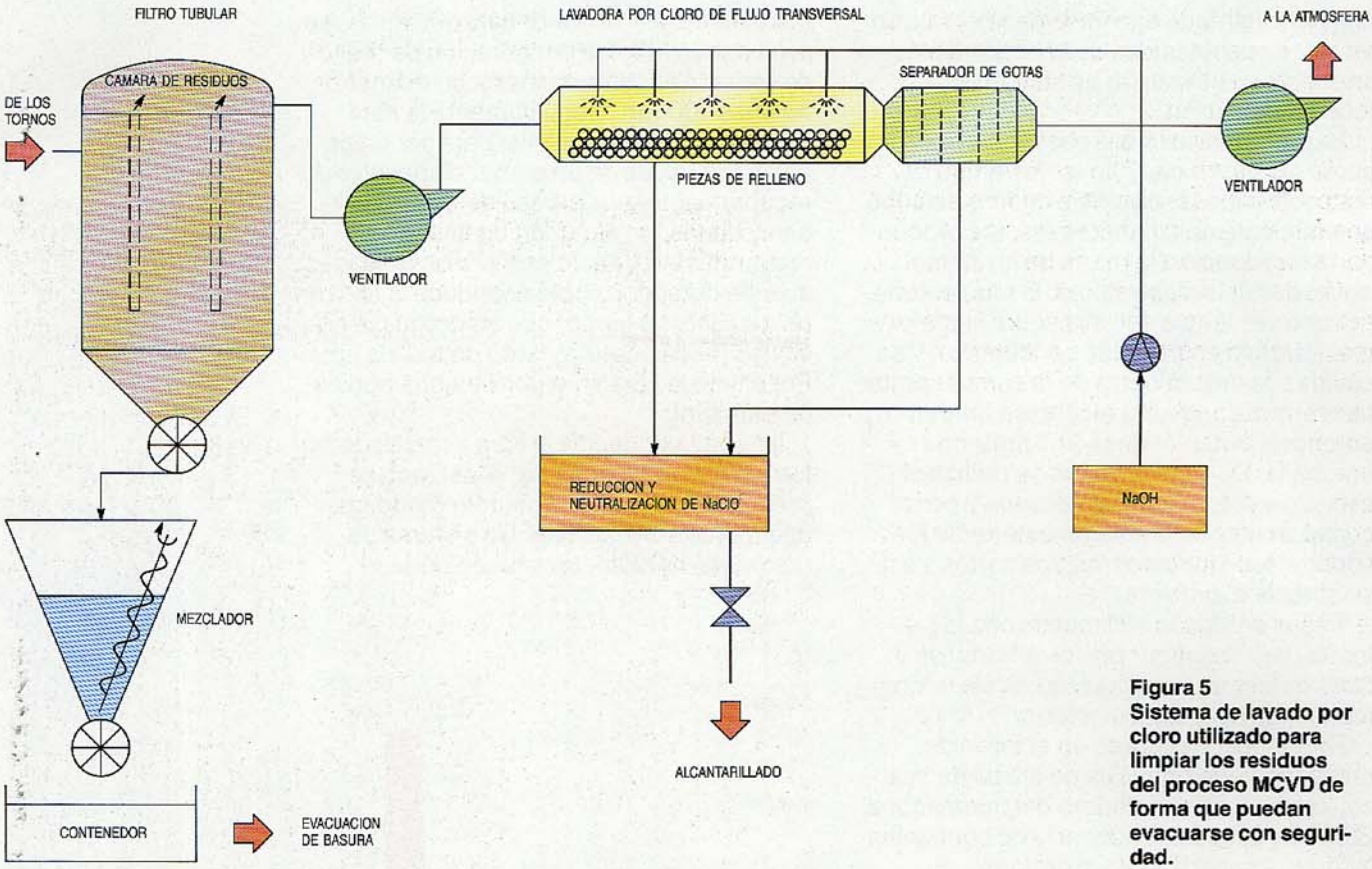


Figura 5
Sistema de lavado por cloro utilizado para limpiar los residuos del proceso MCVD de forma que puedan evacuarse con seguridad.

horno y el tubo de refrigeración por helio comprueba el diámetro de la fibra de vidrio mil veces por segundo y envía esta información a la polea principal, que aumenta o reduce la velocidad de estirado para mantener en 125 µm el diámetro de la fibra desnuda con precisión de ± 0,5 µm.

A la fibra se le añaden dos capas de recubrimiento plástico para protegerla de las impurezas, mejorar su estabilidad mecánica y prepararla para posteriores procesos de fabricación como el coloreado y cableado. Una capa resiliente interior de acrilato curado con UV absorbe los esfuerzos aplicados a la fibra durante operaciones tales como el cableado y el tendido del cable. Sobre el primer recubrimiento se añade una capa dura exterior de acrilato curado con UV, que debe ser lisa y completamente curada ya que una superficie desigual provocaría grandes esfuerzos de fricción durante el proceso de coloreado, llegando tal vez a romper la fibra.

Las capas de acrilato se curan en varias unidades de curado (Fig. 4), cuyo numero junto con la altura de la torre de estirado y la longitud del sistema de enfriamiento por helio determina la velocidad de estirado de la fibra. Son usuales las velocidades de estirado menores de 5 m/s, con torres de 12 m de altura provistas de cuatro unidades de curado y un sistema refrigerador de 1,5 m de longitud. Tras el estirado de la fibra se prueba la "pegajosidad" de cada sección en una unidad separada, comprobando si la capa exterior de acrilato se ha curado por completo[2]. Si así no fuera, deberían reemplazarse las fuentes de luz UV en las unidades de curado para garantizar un curado total.

Bobinado

La longitud total de fibra estirada que hay en cada carrete se prueba de rutina a 8,6 N (1% de elongación). La fibra se arrolla en carretes de medición con tensión nula y se corta en largos estándar de 6,4 km ó 12,6 km. Las fibras para aplicaciones especiales están probadas a 18 N.

Una vez medidas todas las características ópticas y geométricas, los resultados se codifican y anotan en la etiqueta fijada a cada carrete. Además, las fibras se clasifican en tres niveles de calidad, principalmente por su atenuación. A continuación se rebobinan en los carretes de transporte, y quedan dispuestas para la siguiente etapa de fabricación, que puede ser el cableado.

Limpieza de residuos

Durante la deposición de las capas de vidrio para obtener la preforma, sólo se deposita como vidrio en el interior del tubo sustrato aproximadamente la mitad de los productos

químicos utilizados, debiendo eliminar los restantes. La mezcla residual de sólido y gases pasa a través del contrapunto del torno de vidrios como desecho del proceso, con ayuda de un ventilador de alta presión y un filtro tubular (Fig. 5). Este filtro separa los restos sólidos del proceso, debiendo tener una superficie lisa para evitar que los sólidos se le adhieran en exceso.

Al estar cerrada la cámara de residuos, éstos deben atravesar el filtro con lo que los restos sólidos se adhieren a la superficie exterior del tubo. Como el filtrado es continuo, el filtro se obstruiría rápidamente si no se limpiase, lo cual se efectúa mediante una onda de aire a presión que penetra a alta velocidad en el filtro, desprendiendo del tubo los restos sólidos que caen a una tolva y de ahí a un mezclador.

En el mezclador de rotación lenta dichos residuos sólidos se amasan bien con agua, y cuando la pasta resultante alcanza cierta cantidad, se abre una válvula deslizante y dicha pasta cae a un contenedor. Tras comprobar la autoridad que la mezcla no es tóxica, se puede evacuar al basurero.

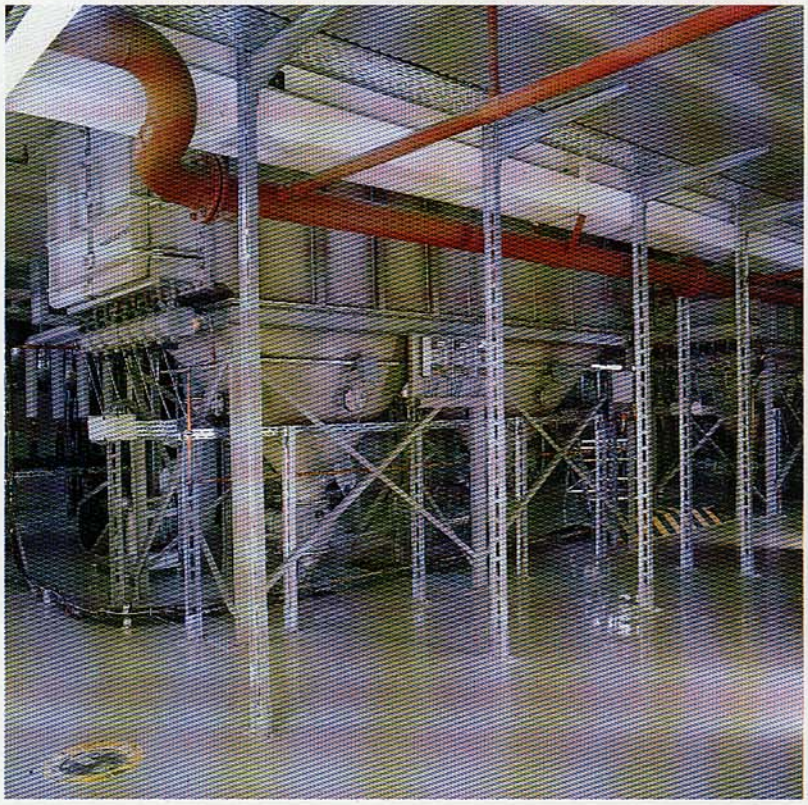
Lavado por cloro

El cloro gaseoso y los compuestos de cloro que pasan a través del filtro de tubo, se introducen en una lavadora donde se "espolvorean" con minúsculas gotas de lejía sódica que adsorben los gases de la superficie (sin reacción química). Las gotitas con los gases residuales adsorbidos caen en unas "piezas de relleno" * donde se produce una reacción química que genera NaClO y NaCl. Mediante un procedimiento especial se neutraliza luego esta solución, consiguiéndose un pH aproximado de 7 de manera que se pueda verter con seguridad al alcantarillado público[3].

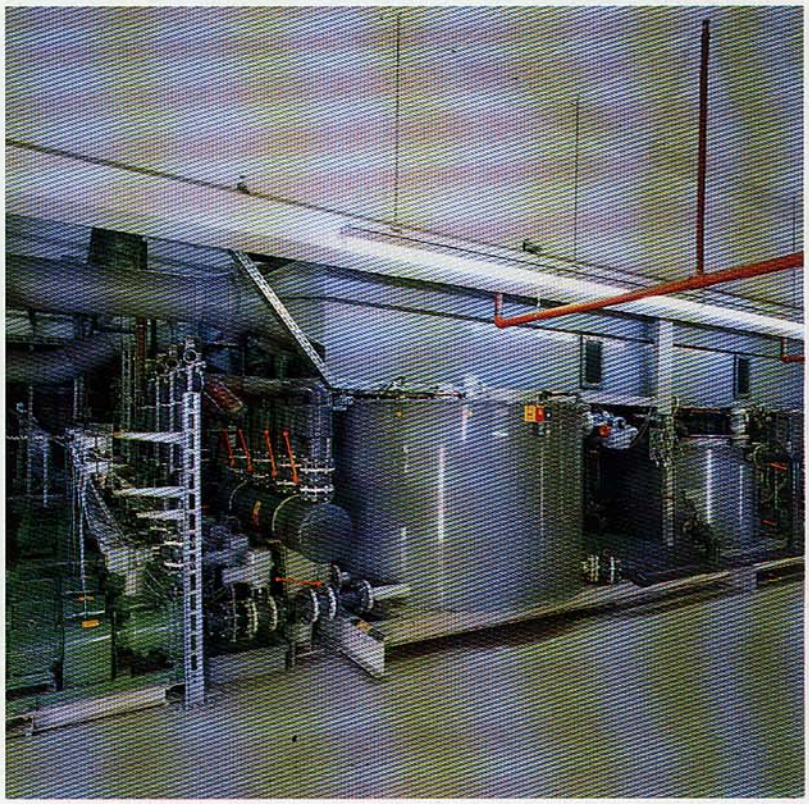
Todas las gotas remanentes de lejía se separan luego de los residuos lavados. Las gotas chocan con las placas de pantalla de un separador (Fig. 5), donde se depositan. El líquido vuelve entonces a la lejía de lavado mientras los residuos purificados se lanzan al aire. El máximo nivel de emisión de cloro permitido en la República Federal de Alemania es de 5 mg/m^3, cantidad muy superior a la que produce este método, usualmente por debajo de 0,8 mg/m^3.

Residuos del quemador

La elevada temperatura del quemador oxhídrico hace que se "volatilice" del 10 al 20% del volumen del tubo sustrato. Los restos de SiO_2 resultantes (residuos del quemador) son continuamente aspirados por ventiladores que van montados encima de dicho quemador. Tales residuos se llevan también a un filtro tubular en el que se



La evacuación segura de residuos es un importante aspecto de muchos procesos de fabricación. El filtro tubular (arriba) elimina los restos sólidos de los residuos del proceso y después un sistema de lavado (abajo) neutraliza todo el cloro remanente en estos residuos.



* Numerosos cilindros de plástico delgado que ofrecen una gran superficie sobre la que se verifica la reacción entre la lejía sódica y los gases residuales.

eliminan por el procedimiento ya descrito. Dado que los residuos del quemador no contienen cloro en absoluto, pueden arrojarse a la atmósfera después de su limpieza en el referido filtro.

Conclusiones

La fabricación de fibras ópticas para aplicaciones de telecomunicación requiere un cuidado considerable, dada la necesidad de conseguir un perfil de índice de refracción de gran precisión y unos bajos niveles de impurezas. Tanto la técnica estándar MCVD para la producción de preformas de fibras como el método de entubado para la fabricación de preformas de mayor longitud se están utilizando con gran éxito en Alcatel. Por sus ventajas económicas, Alcatel solamente produce fibras ópticas mediante el proceso de entubado. La fibra se estira y luego se recubre con capas de acrilato en un único proceso, en el que se utiliza una ingeniosa torre de estirado.

Se ha prestado considerable atención a la eliminación de residuos procedentes de estos procesos. En su planta de fabricación de fibra óptica, Alcatel SEL ha construido una completa instalación que trata los gases y sólidos residuales de forma que la mayoría de ellos puedan evacuarse con seguridad a la atmósfera o al alcantarillado público.

Referencias

1 R. Freidinger: Lichtwellenleiter und Lichtwellenleiterkabel: *Jahrbuch Optoelektronik 1988*, VCH Verlagsgesellschaft, págs. 33–64.
2 W. Lautenbach y K. Wurm: Meßvorrichtung zur Bestimmung der Klebrigkeit von Lichtwellenleitern: *Deutsche Patentanmeldung DE–OS 3842695*, 19 diciembre 1988.
3 R. Wahl y E. Walz: Verfahren und Vorrichtung zur Entfernung von staub- und gasförmigen Schadstoffen aus Abgasen, insbesondere Abgasen bei der Lichtwellenleiter-Vorformherstellung: *Oficina Europea de Patentes*, Patente n° 0237464, 5 febrero 1986.

Willi Kiesewetter nació en 1946 en Neustadt/Coburg, República Federal de Alemania. Estudió ingeniería mecánica en el Polytechnikum de Coburg, y después ingeniería química en la Universidad de Stuttgart. Más tarde obtuvo el grado de doctor ingeniero por una investigación sobre una máquina centrífuga especial. En 1982 el Dr. Kiesewetter entró en SEL, dedicándose al campo de las fibras ópticas. Desde 1984 dirige la fabricación de fibras ópticas en Alcatel SEL.

Concepto de calidad total

Tiempo atrás, asegurar la calidad era el feudo de un pequeño grupo de especialistas que revisaban cada nuevo producto con ojos de "experto" para cerciorarse de que cumplía los requisitos exigidos. En caso de encontrar defectos, ellos conocían su causa e intentaban corregirlos. Hoy se reconoce cada vez más que una garantía económica de la calidad debe apoyarse en el trabajo en equipo de todas las funciones interesadas, aplicando un concepto de calidad total.

H. Lang
Alcatel SEL, Stuttgart, República Federal de Alemania
B. Lefebvre
Alcatel CIT, Vélizy, Francia

Introducción

Los niños utilizan regularmente productos técnicos como teléfonos, radios y relojes digitales sin comprender su funcionamiento, pero el problema surge cuando la radio enmudece o el reloj se para. Lo mismo ocurre con los adultos que emplean productos de alta tecnología, frecuentemente para tareas importantes: si el equipo no cumple sus expectativas, deducen que la "alta calidad" no era sino un reclamo publicitario. Si un cliente percibe que el problema proviene de un fallo en el concepto del producto o en su fabricación, probablemente acudirá a otro fabricante para futuras adquisiciones.

Incluso las grandes compañías internacionales se enfrentan a clientes más críticos. Los cambios rápidos en la tecnología de productos y su fabricación en varios lugares, posiblemente con diferentes especificaciones y procedimientos, complican aún más la situación. No hay, sin embargo, disculpa para los problemas de arranque. Muy en su derecho, el cliente insiste en recibir un producto que ofrezca la calidad de funcionamiento prometida, y además espera un pleno apoyo y rápida atención a sus demandas de ayuda siempre que tenga dificultades.

Todo fabricante tiene que asumir estos retos, particularmente en el competitivo entorno de la Comunidad Económica Europea. Ya no existen proveedores "de la casa real", por consiguiente los productores deben introducir estrategias y conceptos capaces de satisfacer la creciente aspiración hacia una excelente calidad.

Concepto total de la calidad

Sin duda la calidad que reclama el usuario debe ser producida y asegurada mediante los procedimientos relevantes. Se plantea aquí la cuestión de conseguir esto de un modo rentable y sin penalizar el programa de entregas. Para garantizar la calidad en una factoría, ¿bastarán las medidas de aseguramiento de calidad y la tradicional división de tareas dentro de la gestión de calidad? La breve respuesta es que ciertamente no basta con revisar en términos de "bueno/malo" productos totalmente desarrollados y fabricados antes de su salida de fábrica, ni tampoco con aplicar un conjunto de procedimientos normales de aseguramiento de calidad. Por el contrario, una garantía de calidad integrada comprende el desarrollo, la producción y todas las demás funciones relevantes.

El objetivo a largo plazo es propiciar un cambio de cultura de producción que haga de la calidad una parte integrante y muy prioritaria de la política de fabricación. Es la dirección quien debe promover el avance hacia un *concepto de calidad total*, que exige a todos los empleados, sea cual fuere su nivel, cierta responsabilidad en la calidad; cada operario debe saber que responde de la calidad de su propio trabajo, y debe certificar que el resultado que obtiene alcanza los niveles requeridos. Dentro de esta óptica, un trabajador es a la vez "cliente" del trabajador que le precede en la línea de producción y "suministrador" del que le sigue en dicha línea (Fig. 1).

La relación de cliente a suministrador se puede aclarar formulando estas preguntas:

¿Quiénes son los compradores/clientes de mi actividad?

- ¿Reciben de mí exactamente lo que esperan (p. ej., un producto bueno y fiable a precio razonable y en el tiempo correcto?
- ¿Están informados de mis capacidades o recursos, tales como especificaciones de servicio oportunas, servicio fiable y apoyo en caso de dificultades?

¿Qué suministradores tiene mi actividad?

- ¿Les he informado de lo que realmente necesito (p. ej., exacto acuerdo sobre los requisitos, especificaciones claras)?
- ¿Conozco sus capacidades/recursos, como especialización profesional, técnicas informáticas, procesos controlados?

¿Cómo cumple mi trabajo los requisitos declarados e implícitos de mis clientes, y cómo corresponde a las expectativas de mis suministradores?

- ¿Cuáles son los fallos, si los hubiere (p. ej., entregas erróneas, incompletas, de mala calidad)?
- ¿Cómo puedo eliminar las causas de los fallos (mejorando o corrigiendo instrucciones, especificaciones incompletas, fallos de calidad de mano de obra o procesos, etc.)?

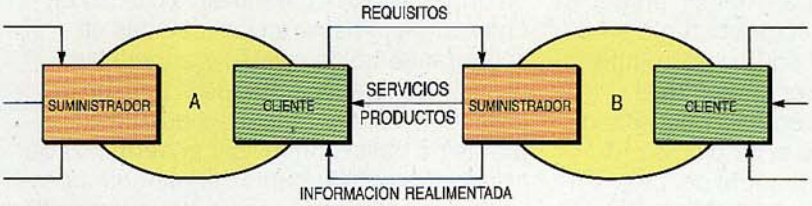


Figura 1
Relación total de control de calidad entre suministrador y cliente.

Los criterios deben ser calidad, tiempo y coste, en el orden señalado; si se respetan durante todo el ciclo de vida del producto, el cliente verá atendidas sus exigencias en el momento adecuado y al precio acordado. Además, si se le presta un soporte correcto tras la compra y mientras el producto perdure, y recibe pronta y eficaz ayuda en cualquier problema, quedará satisfecho y será muy probable que mantenga su lealtad de cliente.

Mejora continua

Los procesos y procedimientos deben mejorarse continuamente para mantener competitivos los costes, introducir nuevas tecnologías e incorporar cualquier reacción de los usuarios. Una calidad total exigirá la optimización y calificación de todos y cada uno de tales procesos y procedimientos, de manera que el "producto" resultante cumpla la especificación técnica del cliente con todos los requisitos asociados, y ello ocurra ya la primera vez, sin necesidad de modificaciones. Este enfoque preventivo persigue además constantemente mejoras que reduzcan la necesidad de controles y pruebas después de cada etapa de la producción.

Responsabilidad individual

El concepto de calidad total es esencial para asegurar que todo individuo de una organización sabe cómo influye la calidad de su trabajo en la calidad total del producto acabado. No puede lograrse una calidad elevada a reducido coste mientras todos los empleados no hagan de la calidad de su trabajo cuestión de honor personal, y en tal caso ni las presiones de la dirección, ni el apremio de los clientes en espera, ni siquiera las cláusulas de penalización de los contratos podrán afectar a la calidad. Convencidos del compromiso de la dirección con la alta calidad, los empleados rehusarán entregar trabajos poco refinados, aunque surjan conflictos o problemas por alcanzar esa calidad.

Una vez lograda esta "concienciación", el clásico enfoque de garantizar la calidad mediante inspección en los puntos críticos deja paso al de controlar la eficacia del sistema de aseguramiento de calidad, y calificar e implantar modernas herramientas asociadas al mismo. Durante largo tiempo los responsables del control de calidad han intentado mejorar por su cuenta la calidad del producto; hoy día la situación ha cambiado, y la responsabilidad de la calidad se extiende prácticamente a todos los departamentos de la organización productora.

Cooperación suministrador-cliente

La cooperación entre suministrador y cliente es otro factor importante para el logro de mejoras a largo plazo en la calidad del producto al tiempo que aligera el esfuerzo de fabricación. Esta mutua relación debe aportar beneficios tangibles a ambas partes. La teoría de la motivación sostiene que solamente puede prosperar tal relación si se dan ciertas condiciones básicas, como el estímulo adicional que para los empleados supone el aprecio de su labor y sentirse autorresponsables. Cuando se aplica esta teoría juntamente con el concepto de calidad total, no sólo es posible alcanzar la calidad exigida de un

producto sino además introducir otras opciones que aumenten la satisfacción del cliente.

Para aclarar esta última afirmación, conviene situarse en el lugar del cliente. ¿Puede uno seguir satisfecho con un producto si para una sesión de mantenimiento el técnico pone la oficina patas arriba y la deja luego en tal estado? ¿Se puede tolerar que en el caso de ocurrir un fallo el técnico de servicio intente convencernos de que hemos cometido una serie de errores estúpidos al manejar el producto? Estos y otros aspectos de la calidad van más allá del producto en sí, y su conjunto determina si el cliente está de verdad satisfecho y volverá a comprar productos al mismo fabricante.

Los clientes no sólo exigen alta calidad del producto, sino que además necesitan y esperan que el fabricante dedique suficientes recursos al servicio postventa, y consideran esta atención como un valioso aspecto complementario del producto. Todo fabricante debe ser consciente de ello, y cultivar una actitud de apoyo a sus clientes.

Diversas plantas de producción han formulado preguntas y ofrecido soluciones en lo que al soporte del cliente se refiere. Un programa de acción podría incluir puntos clave como los siguientes:

- el cliente debe quedar satisfecho
- es el cliente quien debe volver (no el producto)
- ¡el cliente es el activo de más valor para el fabricante!

Un programa así, cuyo nivel evidencian los temas señalados, debe contar con el apoyo activo de la dirección de la empresa. Su objetivo principal apunta a cambiar los hábitos de los departamentos de marketing, ventas y servicio con el fin de que vendan el producto amparado por un servicio completo, y no el producto por sí solo.

Adoptando ahora la óptica del suministrador, la industria eléctrica suele adquirir de un 60 a 80% del valor del producto en forma de equipos y programas, por lo que la planta depende de la calidad de las mercancías que compra. Las clásicas herramientas de aseguramiento de calidad no pueden reducir a un mínimo los riesgos para el cliente, puesto que no ayudan a evitar los fallos. Por ello habrá que ampliar el "juego de herramientas" para que la referida función sea a la vez económica y eficaz en el futuro. Además, hay que atender la necesidad de unos ciclos rápidos en la inspección y pruebas de entrada (filosofía del "justo a tiempo") y por ello es esencial que los suministradores participen en una fase temprana del desarrollo del producto.

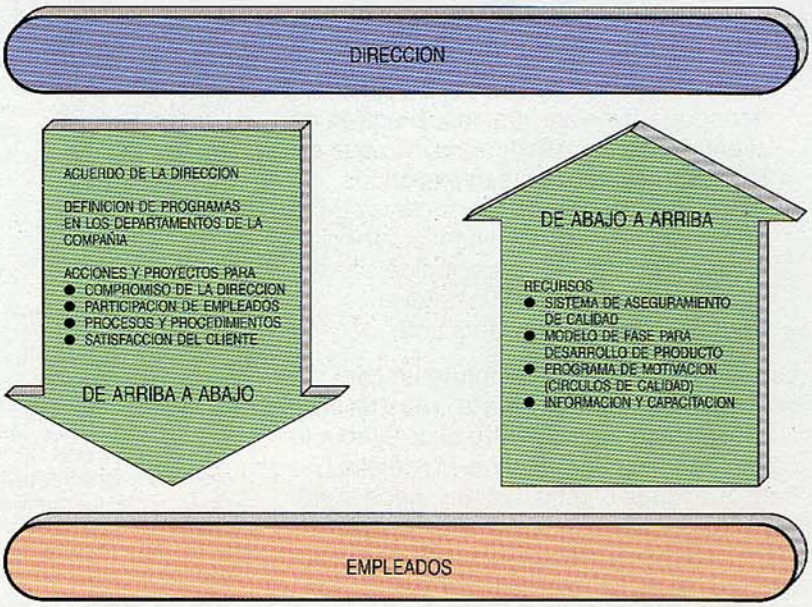


Figura 2
Procedimientos de control de calidad total.

A lo largo de todo el proceso de generación del producto deben mantenerse las relaciones cliente-suministrador cubriendo el concepto de calidad total. Los acuerdos resultantes durante las fases de este proceso son válidos para todas las funciones implicadas:

- cliente o mercado-marketing: los requisitos del cliente o del mercado deben reflejarse con realismo en la capacidad de producción disponible, incluidos desarrollo, fabricación, ensamble del sistema y servicio al cliente. Las exigencias imposibles de atender deben eliminarse antes de la ratificación final del contrato, siendo los requisitos acordados la base de la especificación de trabajo para marketing.
- Marketing-desarrollo: a partir de la especificación de marketing se deducen las especificaciones técnicas de trabajo. El proceso de desarrollo debe finalmente satisfacer estos requisitos, tanto de equipo como de soporte lógico, a la hora de probar el prototipo.
- Desarrollo-fabricación: los resultados del desarrollo deben transferirse a la producción. Las nuevas exigencias que plantee ese paso deben ser atendidas en una fase temprana por las ingenierías de desarrollo, fabricación y pruebas.
- Compras-suministrador: en un grupo que incluya especialistas técnicos el departamento de compras tiene que acordar las funciones detalladas y los criterios de calidad, con la meta final de modificar o mejorar los procesos y procedimientos del suministrador. Este aspecto crece en importancia al

aumentar la integración y complejidad de los componentes.

- Ventas o servicio-cliente: el embalaje, transporte e instalación en los locales del cliente debe estar en línea con lo que el mercado requiere y las necesidades particulares del cliente. Se incluye aquí la documentación, formación y asistencia al cliente durante la operación del producto, que deberán reflejar los elevados niveles de calidad del fabricante.

La calidad total será en el futuro un concepto estratégico vital para la industria de avanzada tecnología, dentro de la Comunidad Económica Europea y fuera de ella. Para que tenga efectividad real, debe afectar a todas las funciones de una organización. Finalmente, la búsqueda de una calidad óptima es un reto personal para todos y cada uno de los que participan en la creación de productos (Fig. 2).

Hermann Lang nació en Munich, en 1939. Tras su graduación en ingeniería industrial en la Universidad Técnica de Stuttgart, fue promovido al área de técnicas de medición. En 1981, el Sr. Lang entró en SEL para ser responsable de las nuevas tecnologías y en 1983 pasó a hacerse cargo de la gestión de aseguramiento de calidad en dicha compañía.

Bernard Lefebvre nació en París, en 1937. En 1960 obtuvo un diploma en ingeniería del Institut Supérieur d'Electronique de París y en 1972 ingresó en Alcatel como jefe de proyecto para desarrollo de sistemas de conmutación telefónica, incluyendo la central de tránsito E12 y y el punto de acceso a videotex. En 1986 fue transferido a Alcatel CIT Inc en los Estados Unidos como vicepresidente para investigación y desarrollo. Al siguiente año fue nombrado responsable de control de calidad para conmutación pública en Alcatel CIT. Desde entonces, el Sr. Léfebvre ha trabajado en cooperación con France Télécom para extender el aseguramiento de calidad y la mejora de calidad a todas las áreas de la Compañía, comprendidos los departamentos técnico, industrial, de instalación, estratégico y administrativo.

En este número

Duhm, E.-J.; Wielockx, A.
De la investigación a la producción en serie
Comunicaciones Eléctricas (1989), volumen 63, n° 2, págs. 80–85

El resultado de la investigación a menudo es un conjunto de principios cuya viabilidad y aplicabilidad se demuestran mediante modelos. La planificación y la realización del producto darán por resultado final un producto totalmente documentado, apto para ser producido en serie. Los autores analizan la necesidad de establecer tecnologías básicas de producción en las fábricas para acomodarse a nuevas tendencias tecnológicas y nuevas exigencias de los productos, y el modo en que una pronta transferencia de tecnología de investigación a producción ayuda a garantizar que los productos se introducen lo antes posible.

Rice, J.M.; van der Donk, J.
Aprovisionamiento y normalización de componentes
Comunicaciones Eléctricas (1989), volumen 63, n° 2, págs. 86–92

Las diferentes culturas industriales y técnicas que atesora Alcatel junto con la estructura de gestión descentralizada de esta Compañía plantean unos retos singulares en la gestión de materiales, donde son esenciales las economías de escala y los ciclos de corta duración. El coste de los materiales de un producto de telecomunicación típico puede ascender hasta un 40 a 45% del valor de venta. Dado que Alcatel solamente fabrica un limitado número de componentes estratégicos, es esencial asegurar que el aprovisionamiento de materiales y componentes de suministradores externos satisface las necesidades de la Compañía en cuanto a precio, calidad, y entrega. Los autores describen la estructura global de gestión del aprovisionamiento y la normalización de materiales dentro de Alcatel, a niveles empresarial y operativo.

Maulay, D.; Verspecht, J.
Industrialización del producto
Comunicaciones Eléctricas (1989), volumen 63, n° 2, págs. 93–98

El proceso que va de la concepción de un diseño a la fabricación en serie del producto terminado es uno de los factores más importantes en la obtención de un producto aceptado y de alta calidad. La velocidad y la efectividad de ese proceso son piezas clave en el desarrollo del producto. La industrialización del mismo se centra en las maneras de introducir productos nuevos, con la mayor rapidez y el menor coste de producción. Los autores describen los métodos que emplea Alcatel para conseguir estos objetivos. Aspectos importantes de su enfoque son la estrecha cooperación entre ingeniería y fabricación desde la etapa inicial de diseño, la revisión formal y aceptación del producto por el departamento de fabricación, y la definición de reglas de diseño que reduzcan al mínimo los costes de fabricación.

Hurault, P.; Kopa, H. R.; Kreft, K.
Fabricación asistida por ordenador, sistemas de fabricación flexible, y simulación
Comunicaciones Eléctricas (1989), volumen 63, n° 2, págs. 99–106

La creciente complejidad de los productos modernos exige avanzadas ideas de fabricación para conseguir unos costes de producción mínimos y una máxima fiabilidad. Factores clave para alcanzar este objetivo son la fabricación asistida por ordenador (CAD), una fabricación flexible y la simulación de la producción. Los autores describen la estructura de un entorno CAM y demuestran que una moderna concepción de sistema de fabricación flexible permite producir una diversidad de productos con un mínimo trabajo en curso, cortos tiempos de entrega y respuesta rápida a las cambiantes demandas. Asimismo analizan una herramienta de simulación como soporte de planificación y control de la fabricación.

Bolay, F.; Waldraff, A.; White, A.;
Sistemas de planificación y control de fabricación
Comunicaciones Eléctricas (1989), volumen 63, n° 2, págs. 107–114

Los sistemas de planificación y control de fabricación actuales proceden de los primitivos sistemas de planificación de necesidades de material, que se fueron desarrollando y ampliando hasta convertirse en sistemas de planificación de recursos de fabricación (MRP II), capaces de controlar la mayoría de los recursos disponibles en una compañía. Sin embargo, como el papel de la fabricación ha cambiado apreciablemente desde que tales sistemas fueron concebidos, se hace ahora necesario reexaminar sus funciones y alcance a la luz de las necesidades actuales. Los autores describen las funciones y aplicación de los sistemas de planificación de recursos de fabricación y describen los desarrollos en curso para mejorar las facilidades existentes e interconectar estos sistemas con otras funciones de la empresa.

Aerts, R.; Bech, P.; Le Friec, J.-P.
Importancia y efectos de la filosofía "justo a tiempo"
Comunicaciones Eléctricas (1989), volumen 63, n° 2, pags. 115–121

La filosofía denominada "justo-a-tiempo" o JIT (just-in-time) es un concepto sencillo pero con implicaciones importantes en las empresas que la adoptan. En consecuencia, la aplicación e introducción del JIT tiene casi tantas formas distintas como instalaciones hay, variando su complejidad desde los elaborados sistemas informatizados hasta los sencillos ajustes de sentido común realizados en plantas de fabricación. Plenamente realizado, el JIT abarca la cadena entera de fabricación de un producto, y es mucho más que un método de reducción del inventario en almacenes, en planta y en el almacén de productos terminados. Los autores describen la aplicación del principio JIT por tres compañías Alcatel , centrándose sobre el área de fabricación dentro de la cadena de suministro y en el modo en que cada una de estas compañías ha combinado JIT con la "teoría de las restricciones" para deshacer los atascos en la fabricación.

Meesemaecker, P.; Rozumek, W.; Tarrieu, R.
Introducción a la tecnología de dispositivos de montaje superficial
Comunicaciones Eléctricas (1989), volumen 63, n° 2, págs. 122–129

El empleo de los dispositivos de montaje superficial (SMD) se considera generalmente como una revolución en la industria electrónica a la vista de las economías de tamaño y espacio que pueden lograrse. En el futuro, el uso exclusivo de SMD ayudará a reducir señaladamente costes de producción y plazos de entrega como efecto del alto nivel de automatización y de un menor número de etapas de fabricación. Los autores describen las etapas de producción básicas requeridas para poner en práctica la tecnología SMD, utilizada ya por Alcatel en gran número de dispositivos. Ha facilitado su implantación la intensa cooperación entre los departamentos técnico y de fabricación para seleccionar las combinaciones más apropiadas de procesos de fábrica, dispositivos SMD y reglas de diseño, así como para la calificación del proceso en colaboración con los principales usuarios.

Andersen, V. S.; Caratti, G.; Mertens, F.
Estrategias de prueba
Comunicaciones Eléctricas (1989), volumen 63, n° 2, págs. 130–136

Las modernas estrategias de prueba están determinadas por los costes directos y por dos factores indirectos que han adquirido creciente importancia en el desarrollo de nuevos productos: el tiempo de puesta en mercado y el tiempo de producción. Los autores exponen el gran impacto de estos dos factores en la forma de pensar y trabajar de los ingenieros de pruebas. Asimismo describen el concepto de estación de trabajo de ingeniería de pruebas elaborado por Alcatel para ayudar a los ingenieros y responsables de las pruebas a enfrentarse con la evolución de esta problemática. Actualmente se está implantando este concepto en todo Alcatel.

Frank, W.; Sauve, B.
Sistemas expertos para aplicaciones de fabricación y pruebas
Comunicaciones Eléctricas (1989), volumen 63, n° 2, págs. 137–144

Los sistemas expertos se han utilizado en Alcatel para numerosas aplicaciones. Los autores describen la envoltura de sistemas expertos DIAESS que ha servido para desarrollar sistemas aplicables a una gama de funciones de prueba, así como dos sistemas de planificación de fabricación. El DIAESS lleva varios años de uso, especialmente en la diagnosis de fallos de placas del Sistema 12, y se ha instalado en varias compañías Alcatel. El proyecto EUREKA, que desarrolla un sistema de planificación generativa de procesos para la fabricación de piezas, abarca la planificación de los procesos operativos y su secuencia sobre la base de los datos de diseño; se ha realizado ya un primer prototipo. El sistema SONIA, que planifica y controla las actividades de fabricación a corto plazo, puede detectar contradicciones entre el cronograma y el curso real de los acontecimientos en una planta, reaccionando ante ello; integra las funciones de programación, despacho y vigilancia.

Derrien, Y.; Fraile, A.; Hartl, W.; Ijsseldijk, J.
Fabricación electrónica de las centrales de conmutación digital Sistema 12 y Alcatel E10
Comunicaciones Eléctricas (1989), volumen 63, nº 2, págs. 145–151

Los principios de diseño de las centrales Sistema 12 y Alcatel E10, incluyendo su gran modularidad en equipo y soporte lógico, aseguran una fabricación eficaz. Las casas fabricantes han cooperado en el desarrollo y optimización de los procesos de fabricación y pruebas, alcanzando un alto grado de normalización en este campo. Desde que se empezó a fabricar el Alcatel E10 en 1980 y el Sistema 12 en 1983, se han producido millones de líneas de ambos sistemas en todo el mundo. Los autores describen los principales conceptos aplicados en la fabricación y pruebas para garantizar una producción eficaz con elevada calidad y fiabilidad del producto.

Hasler, G.W.
Fabricación de sistemas de comunicaciones de empresa
Comunicaciones Eléctricas (1989), volumen 63, nº 2, págs. 152–158

La fabricación de sistemas de comunicaciones de empresa tiene una larga tradición en Alcatel Austria, que por lo tanto dispone de una completa gama de equipo de fabricación y pruebas para tales sistemas. Sin embargo, la introducción de los sistemas digitales 5200 BCS y 5200 BCN exigió replantearse a fondo el área de fabricación. Mediante una estrecha cooperación entre el personal de fabricación y los diseñadores de sistemas, en las etapas iniciales se identificaron nuevas tecnologías de productos y métodos de proceso. Resultado de ello fueron una serie de cambios en la línea de fabricación, como la introducción de un sistema de fabricación flexible para el ensamble de placas impresas. Desde que empezó a fabricarse el 5200 BCS en 1984, se han producido y entregado más de un millón de líneas.

Chenu, J.-P.; Erdmann, G.; Müller, H.
Fabricación de equipo de microondas para telecomunicación
Comunicaciones Eléctricas (1989), volumen 63, nº 2, págs. 159–167

La fabricación de equipo de microondas es un proceso de producción típico en el que intervienen numerosos tipos de componentes y son pequeños los lotes de fabricación. La gama de productos y la compleja tecnología de la alta frecuencia requieren una estrecha cooperación entre los técnicos de producción y de desarrollo. Los autores describen algunas de las tecnologías involucradas, tales como los circuitos integrados de microondas, los circuitos integrados monolíticos y los guiaondas, detallando los numerosos procesos de fabricación individuales que se requieren para realizar un sistema completo capaz de excelentes prestaciones y elevada fiabilidad.

Schatz, E.; Wauters, J.
Fabricación del soporte lógico
Comunicaciones Eléctricas (1989), volumen 63, nº 2, págs. 168–175

A medida que crece el volumen y la complejidad de los datos en las redes modernas, la producción del soporte lógico se convierte en actividad importante dentro del desarrollo y la fabricación de productos de comunicación. La introducción de la RDSI y las redes inteligentes acelerará esta evolución. Como ejemplo de los procesos de producción de programas, los autores describen los actuales procedimientos de formación para los sistemas de conmutación digital Sistema 12 y Sistema 12B, público y privado respectivamente. Se analiza el papel de la producción del soporte lógico en la ejecución de un pedido, desde el diseño a la instalación, esbozando los factores más importantes para asegurar la calidad a este respecto.

Kiesewetter, W.
Fabricación de fibras ópticas para sistemas de telecomunicación
Comunicaciones Eléctricas (1989), volumen 63, nº 2, págs. 176–182

La fabricación de fibras ópticas se realiza en tres etapas. Durante el proceso MCVD se produce la preforma y con ayuda de la técnica de entubado se procesa la fibra de modo económico en la torre de estirado. Tras la prueba de validación, el corte de la fibra a su longitud normal y la medición de sus características ópticas y geométricas, la fibra se arrolla en bobinas para su transporte. En el proceso MCVD no es completo el cambio de todas las partes de la mezcla de gas, sino que sólo se deposita en el tubo de vidrio la mitad del flujo de gas transportado, debiendo el resto ser extraído y evacuado como residuo del proceso. Esta evacuación de residuos implica un mínimo deterioro al entorno, siempre inferior a los límites marcados por la ley.

Lang, H.; Lefebvre, B.
Concepto de calidad total
Comunicaciones Eléctricas (1989), volumen 63, nº 2, págs. 183–186

En el mercado mundial de las nuevas industrias electrónicas es necesario establecer un *concepto de calidad total*. Según esto, deben asignarse responsabilidades de calidad en cada etapa de la vida de un producto o servicio, incluidas las numerosas funciones y actividades internas de una factoría. Los autores sostienen que todos, desde el operario de taller hasta el gerente de la empresa, deben convencerse de la necesidad de evitar los fallos antes de que deterioren la calidad o incrementen los costos. El punto de mira del concepto de calidad total es la completa satisfacción del usuario con el producto y el servicio que recibe, de modo que continúe siendo cliente.

Oficinas Editoriales

La correspondencia relacionada con las diferentes versiones de Comunicaciones Eléctricas debe dirigirse al editor correspondiente:

Rod Hazell
Electrical Communication
P.O. Box 3
South Street, Romford
Essex, RM12AR, England

Wolfgang Schmid
Elektrisches Nachrichtenwesen
Lorenzstrasse 10
7000 Stuttgart 40
Bundesrepublik Deutschland

Antonio Soto
Comunicaciones Eléctricas
Ramírez de Prado, 5
28045 Madrid
España

Catherine Camus
Revue des Télécommunications
ALCATEL N.V.
33 rue Emeriau
75725 Paris CEDEX 15
France