

# EXPERIENCIA EN LA FABRICACIÓN Y MONTAJE DE PROTOTIPOS DE CIRCUITOS IMPRESOS MULTICAPA CON COMPONENTES SMD DE PASO FINO Y BGA.

A. VEGA, E. ARBELO, C. SANCHEZ, F. DIAZ, J.M. CEREZO, E. VEGA  
Instituto Universitario de Microelectrónica Aplicada, Departamento de Ingeniería Electrónica y Automática, Universidad de Las Palmas de Gran Canaria.

*Se presentan una serie de conclusiones sobre la experiencia adquirida en la fabricación de circuitos impresos, en el Laboratorio de Fabricación de Prototipos y Sistemas Electrónicos del IUMA. Se describen los equipos y servicios disponibles y se realiza un análisis de la problemática de la fabricación y montaje de circuitos complejos multicapa que incorporan componentes SMD de paso fino y BGA. Todo desde el punto de vista de su utilización en prácticas docentes, PFC y proyectos de investigación.*

## 1. Introducción

El Laboratorio de Fabricación de Prototipos y Sistemas Electrónicos del Instituto Universitario de Microelectrónica Aplicada de la Universidad de Las Palmas se ha ido dotando, ampliando y configurando a lo largo de más de cinco años de actividad en la fabricación de prototipos de circuitos impresos. Se comenzó con la adquisición de una máquina fresadora y se ha ido completando hasta permitir en la actualidad, fabricar circuitos impresos de hasta 8 capas y ser capaces de montar prácticamente cualquier tipo de encapsulados existente en el mercado (SMD fine-pitch, BGA, CSP y Flip Chip).

La actividad del laboratorio se centró inicialmente en cubrir las necesidades del grupo en cuanto a la fabricación rápida de prototipos con objeto de verificar su correcto funcionamiento. Posteriormente, según se ha ido creciendo, se ha ampliado la oferta de servicios a otros grupos de investigación, a la realización de PFC y al soporte de asignaturas docentes, así como el servicio externo a empresas a través de la Fundación Universitaria de Las Palmas.

En este trabajo se presenta la configuración actual del equipamiento existente, así como los procesos disponibles, además de realizar un análisis de las necesidades docentes y de investigación que se pueden abordar.

Se finaliza con la presentación de una serie de conclusiones fruto de la experiencia acumulada y que pueden servir de punto de referencia a la hora de configurar otros laboratorios similares.

## 2. Equipamiento y Procesos Disponibles en el Laboratorio

En la Figura 1 se presenta el plano del laboratorio, en el cual queda situado el equipamiento principal del laboratorio.

Para la fabricación de circuitos estándar de 1 o 2 caras sobre sustratos FR4 o CEM3 se utiliza una máquina taladradora/fresadora LPKF 93s [1] dotada con motor trifásico de 60.000 rpm, con un área de trabajo máxima de 380x420mm. Está especialmente indicada para trabajar sobre paneles de circuitos impresos de gran tamaño, ideal para la fabricación de grandes placas y para la preparación de los paneles para circuitos multicapa. Permite la realización de taladros de 0.3mm, pistas de 0,1mm (4 mil) y separación mínima entre pistas de 0,1mm (4 mil). Incorpora el sistema LPKF AutoContac con el que se pueden dispensar pasta de soldadura y cualquier tipo de adhesivos para componentes SMD.

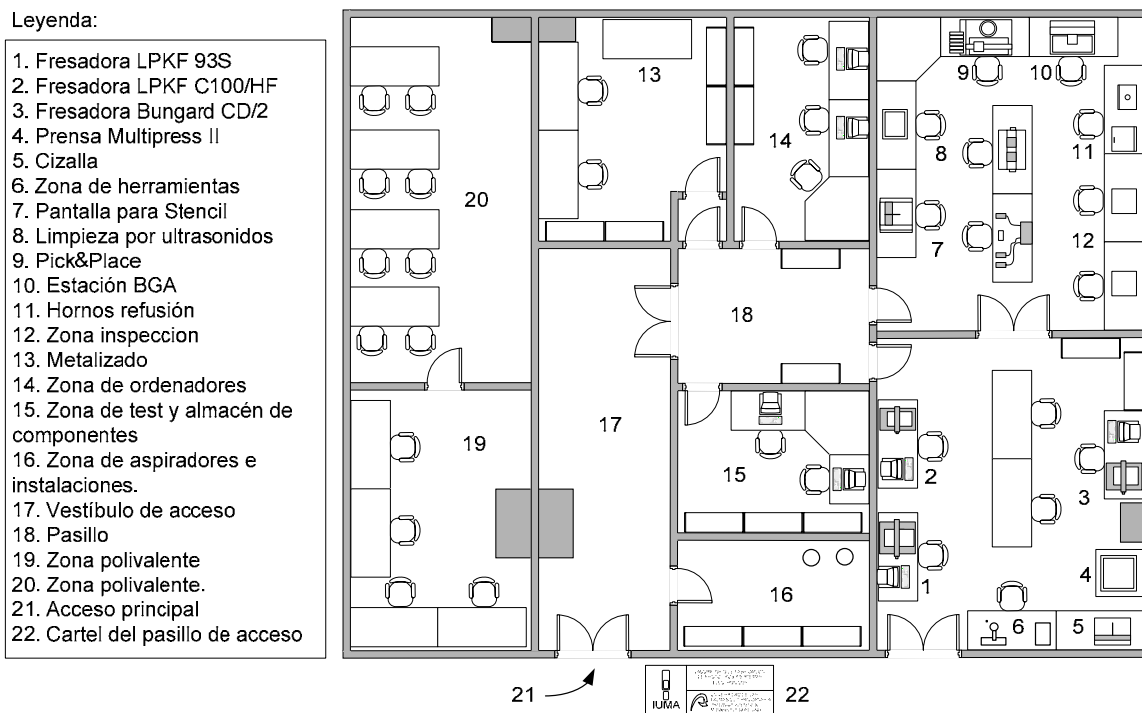


Figura 1. Plano y leyenda de situación del equipamiento del laboratorio.

La fabricación de circuitos RF se realiza mediante una fresadora LPKF ProtoMat C100/HF dotada con motor trifásico de 100.000 rpm., sistema de inspección óptica QuickView y sistema neumático de control de profundidad del fresado. Dispone de una superficie de trabajo de 200x340mm y está especialmente concebida para trabajar con sustratos flexibles y para RF, debido a su alta velocidad de trabajo. Permite la realización de taladros de 0,2mm, pistas de 0,1mm (4 mil) y separación mínima entre pistas de 0,1mm (4 mil). La fabricación de circuitos para RF requiere el empleo de fresas de especiales que permiten un corte perpendicular al sustrato, por lo que se consigue un control muy exacto del corte. Esta fresadora también es utilizada para la fabricación de máscaras de pasta de soldadura para lo que se emplea un polímero de 125  $\mu$ m de espesor.

La metalización de taladros y vías se realiza mediante un banco de metalizado LPKF MiniContac II., que dispone de control por microcontrolador y puede metalizar sustratos de 200x300mm. La fabricación de circuitos multicapa se realiza mediante una prensa LPKF Multipress II controlada por microprocesador que trabaja con una presión máxima de 15 t y una temperatura máxima de 210°C. Con un área de prensa de 420x360mm permite la fabricación de circuitos hasta 305x254mm de 4, 6 y 8 capas.

El montaje de componentes SMD se realiza con una pick&place semiautomática modelo LPKF-ProtoPlace (Figura 2). El proceso de colocación es guiado mediante un sistema de cámara de video. Se puede trabajar sobre una superficie máxima de PCB de 400x300mm y se pueden colocar hasta componentes con footprint 0201. Incluye plato motorizado para almacenaje de componentes y alimentadores para diferentes tipos de tamaños de bobinas. Incluye también dosificador de pasta de soldadura y un sistema neumático permite la colocación semiautomática de los componentes.

Para el montaje de componentes BGA, CSP y Flip Chip, así como componentes fine-pitch y ultra fine-pitch se utiliza una estación semiautomática LPKF Zelplace BGA (Figura 2), que incorpora un sistema de alineación óptica con cámara CCD y permite la colocación de componentes desde 5x5mm

hasta 45x45mm. Su sistema de iluminación con dos colores y los tornillos de ajuste micrométricos proporcionan una exactitud de  $\pm 50\mu\text{m}$  en el posicionamiento de componentes en una superficie máxima de 220x300mm del circuito impreso.

El laboratorio se completa con un microscopio inspección óptica Cellcheck para la revisión y control de calidad de los circuitos fabricados que nos permite medir con exactitud cualquiera de los parámetros de los circuitos fabricados. Un microscopio SONY dotado de cámara CCD y pantalla de cristal líquido para la revisión de las soldaduras realizadas. Un horno de refusión para la soldadura de los que permite el montaje de circuitos impresos de 200x300mm. Estación integrada de soldadura JBC para componentes de inserción que permite la soldadura y desoldadura manual con soldador y aire caliente. Sistema de extracción y filtrado de humos. Cubeta de limpieza por ultrasonidos para la eliminación de residuos del proceso de soldadura.

Para otros trabajos adicionales de mecanización de paneles de aluminio, taladrado de materiales diversos, fabricación de útiles de trabajo, etc. se emplea una fresadora Bungard modelo CCD/2 dotada de un motor trifásico de 60.000 rpm, que dispone de control en los tres ejes X/Y/Z.

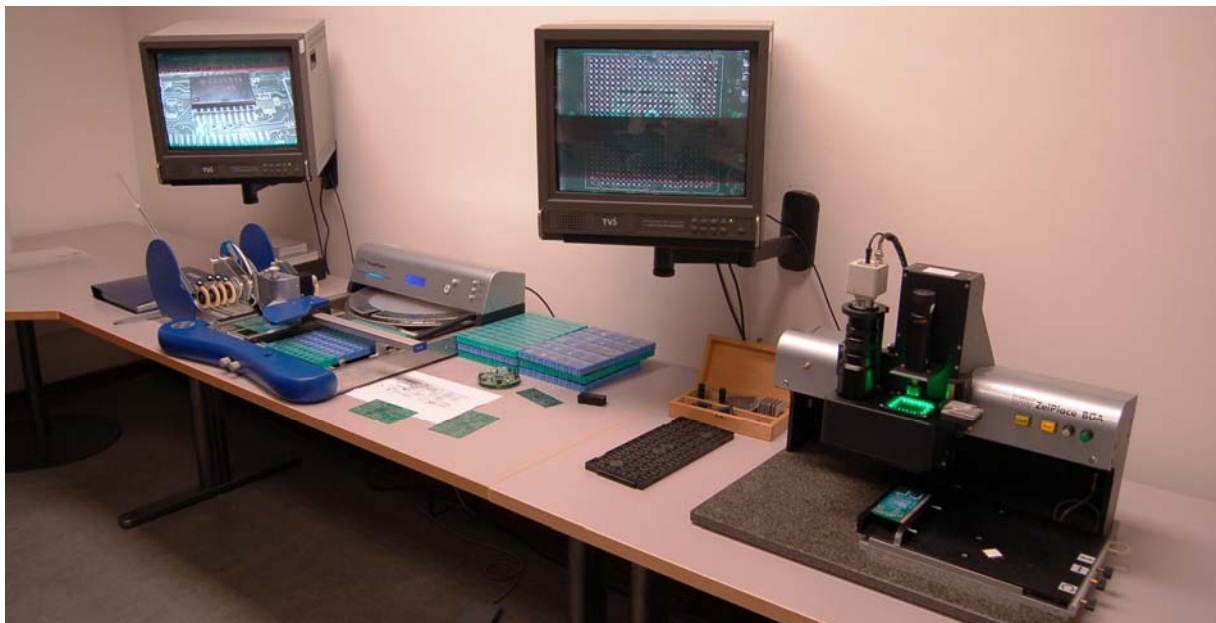


Figura 2. Línea de montaje SMD con Pick&place y BGA

### 3. Proceso de Fabricación de Circuitos Impresos Multicapa

La experiencia en la fabricación de circuitos impresos a doble cara metalizados, fue muy positiva en los primeros años de funcionamiento del laboratorio. Con la primera fresadora LPKF 93s en combinación con el banco de metalizado se conseguían fabricar circuitos clase 3 y 4 sin ningún tipo de problema, una vez que el operario encargado de la máquina disponía de la formación adecuada. Esta formación consiste básicamente en destrozarse una par de placas y romper tres o cuatro fresas. Una vez superada la fase inicial de formación con la fresadora y después de realizar unas cuantas demostraciones de soldadura de componentes SMD de paso fino con la estación de soldadura de JBC, han sido bastantes los becarios en formación y alumnos de PFC, los que han conseguido fabricarse sus placas y montar posteriormente los circuitos impresos con un nivel de destreza suficiente.

El software empleado para la fabricación de los circuitos siempre ha sido el suministrado con las máquinas de LPKF, en concreto se ha utilizado CircuitCAM para el cálculo de los aislamientos y patrones de corte y el BoardMaster para el control de la fresadora. Ambas herramientas nos han dado muy buenos resultados en todos los casos.

Con respecto al tipo de acabado de los circuitos, desde los primeros prototipos fabricados, se ha optado en la casi totalidad de los casos en realizar un vaciado prácticamente completo del cobre, y no limitarse a realizar únicamente los canales de aislamiento. Aunque este procedimiento consume un tiempo considerable, como la mayoría de los circuitos son primeros diseños y el diseñador no suele ser muy experto en el montaje, muchos de los fallos de los circuitos se debían a cortocircuitos producidos por pequeñas virutas de cobre o alguna zona del canal de aislamiento en el que la fresa debido a alguna rugosidad en el cobre superficial que se deposita durante el metalizado, no había profundizado bien dejando pistas cortocircuitadas. Para evitar estos problemas se ha optado por vaciar completamente todas las placas fabricadas, salvo que sean clase 2 y por lo tanto muy simples de fabricar y con poco riesgo. La Figura 3.a muestra un detalle de la sección transversal de una placa fresada y la Figura 3.b la alineación de pines en un encapsulado de paso fino.

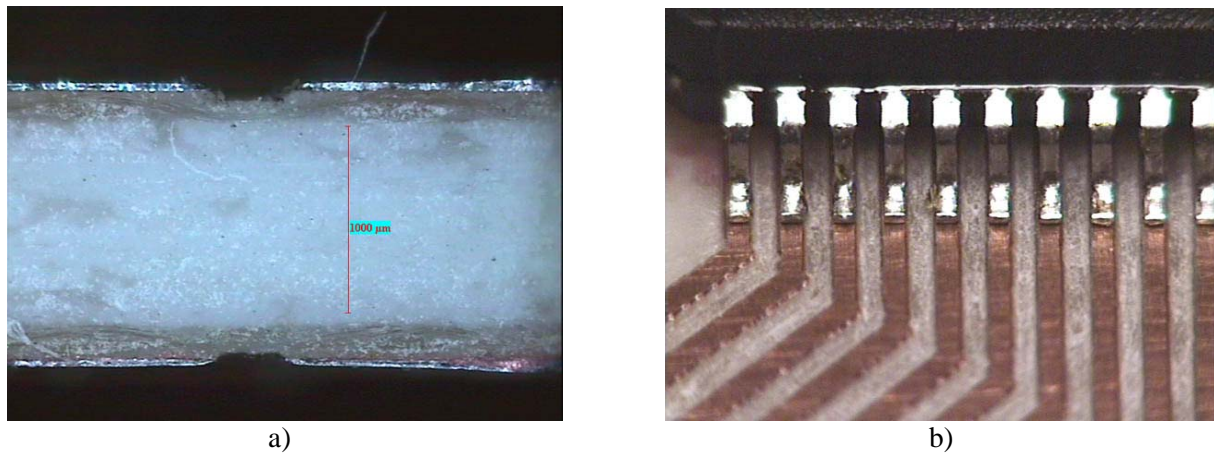


Figura 3. Destalle de sección transversal de un pcb y alineación de pines en encapsulado de paso fino

En todos los caso, se requiere una inspección óptica del proceso de vaciado de los canales de aislamiento. Aunque la máquina trabaje bien durante horas, el desgaste de la fresa hace que se requiera la atención del operario cada quince minutos, para comprobar que la herramienta sigue en buen estado. Cuando la fresa se desgasta produce un corte irregular y más fino de lo habitual. Bajando ligeramente la herramienta se consigue que el trabajo pueda continuar unos metros más. Normalmente se supera con creces la vida media de todas las herramientas, pero únicamente la experiencia es la que dice hasta donde podemos seguir utilizando una fresa o una broca.

El coste de las herramientas es elevado si se compran directamente a los fabricantes de fresadoras. Se han realizados pedidos a distintos proveedores con objeto de evaluar sus herramientas. Como es evidente realizando compras en volumen directamente al distribuidor del fabricante de las herramientas, hemos conseguido bajar el coste unitario medio de las herramientas a la cuarta parte de lo que estábamos pagando inicialmente.

Adicionalmente a la estrategia de compras de las herramientas, se emplean algunos trucos adicionales para alargar la vida media de las herramientas, por ejemplo: a) las fresas de aislamiento de 60° que producen canales de 0,2mm normalmente, cuando están gastadas se guardan y utilizan posteriormente en diseños menos importantes con canales de aislamiento de 0,4mm o 0,5mm simplemente ajustando la profundidad, b) igual que en el caso anterior, si la punta de la fresa de aislamiento de rompe, puede utilizarse en otros diseños, c) para realizar aislamiento grandes se puede

utilizar durante un tiempo cualquier tipo de fresas de corte que ya esté desgasta, d) las fresas de corte dependiendo del tipo de máquina que se utilice pueden ser utilizadas durante más tiempo simplemente jugando con la altura de colocación, con lo que se consigue que el desgaste se reparta a lo largo de toda la caña de la herramienta.

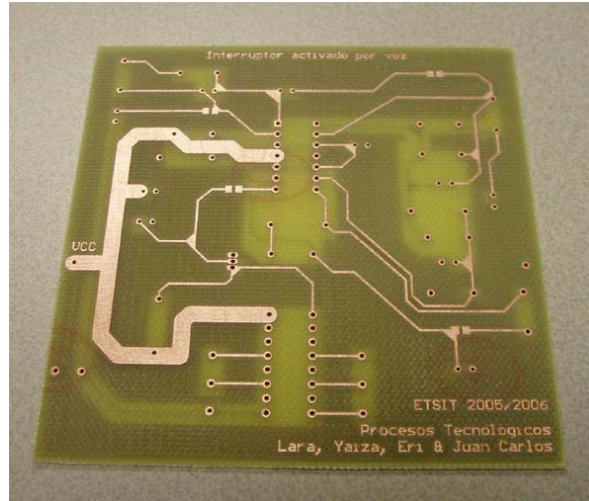


Figura 4. Ejemplo de placa doble cara diseñada por alumnos de la asignatura de “Procesos Tecnológicos”.

Con la complejidad creciente de los diseños que se estaban realizando pronto se vio la necesidad de abordar la fabricación de circuitos multicapa e incorporar al laboratorio la capacidad de trabajar con encapsulado ultra fine-pitch y BGA. Después de evaluar distintas alternativas se optó por seguir con equipamiento de la empresa LDKF, por la buena experiencia que teníamos con este fabricante. En este momento se adquirió la segunda fresadora modelo LDKF ProtoMat C100/HF, la prensa Multipress II, la estación de pick&place y la estación BGA.

La experiencia en la fabricación de circuitos multicapa no es tan amplia como la anterior, pero una vez superados los primeros circuitos fallidos, debido a errores humanos y a no leerse bien los manuales, ya conseguimos fabricar los circuitos a cuatro capas sin grandes problemas. El proceso evidentemente es más largo, ya que se requieren dos días de término medio por circuito, pero como en Canarias estamos acostumbrados a que aduana nos retrase como mínimo dos o tres días cualquier pedidos, este tiempo es razonable.

En la fabricación multicapa el prensado supone unas seis horas, por lo que es habitual comenzar por la mañana o a primera hora de la tarde la preparación de las capas intermedias que son las primeras que hay que aislar y dejar por la noche la prensa funcionando ya que ella sola realiza todo el ciclo de prensado de forma automática. A la mañana siguiente las planchas ya están frías y se puede taladrar y metalizar (unas dos horas en total). El proceso de aislamiento de las capas *top* y *bottom* es normalmente la parte más delicada, ya que habitualmente incorpora el mayor número de pistas. Se suele comenzar con una fresa de aislamiento nueva para conseguir el máximo nivel de calidad solo en diseños muy complejos y de gran superficie se requieren dos fresas. El tiempo de trabajo para el aislamiento del *top* y *bottom* depende de la complejidad del diseño, pero si se aísla completamente, como solemos hacer, se suele tardar entre una y tres horas por cada lado. El record lo tenemos en una placa en la que se emplearon once horas de fresado. La Figura 5 muestra un ejemplo de circuito impreso de cuatro capas diseñado y montado por un alumno en su PFC.

El proceso de fabricación de un circuito a 6 u 8 capas es mucho más delicado, ya que hay que alinear las capas intermedias durante el prensado y además los sustratos sobre los cuales se trabaja las capas internas son muy finos (0,3mm) por lo que hay que vigilar muy bien el proceso de fresado para



no perforar el circuito. En estos casos para lograr alcanzar resultados satisfactorios es necesario una gran dosis de experiencia, paciencia y buen hacer. Aún así, como se requieren muchos pasos es habitual tener que repetir alguna de las capas intermedias, ya que son las más críticas al no poder corregir después ningún desperfecto que se produzca. Es en estos procesos las fresas de aislamiento deben de ser completamente nuevas para que el corte sea preciso.

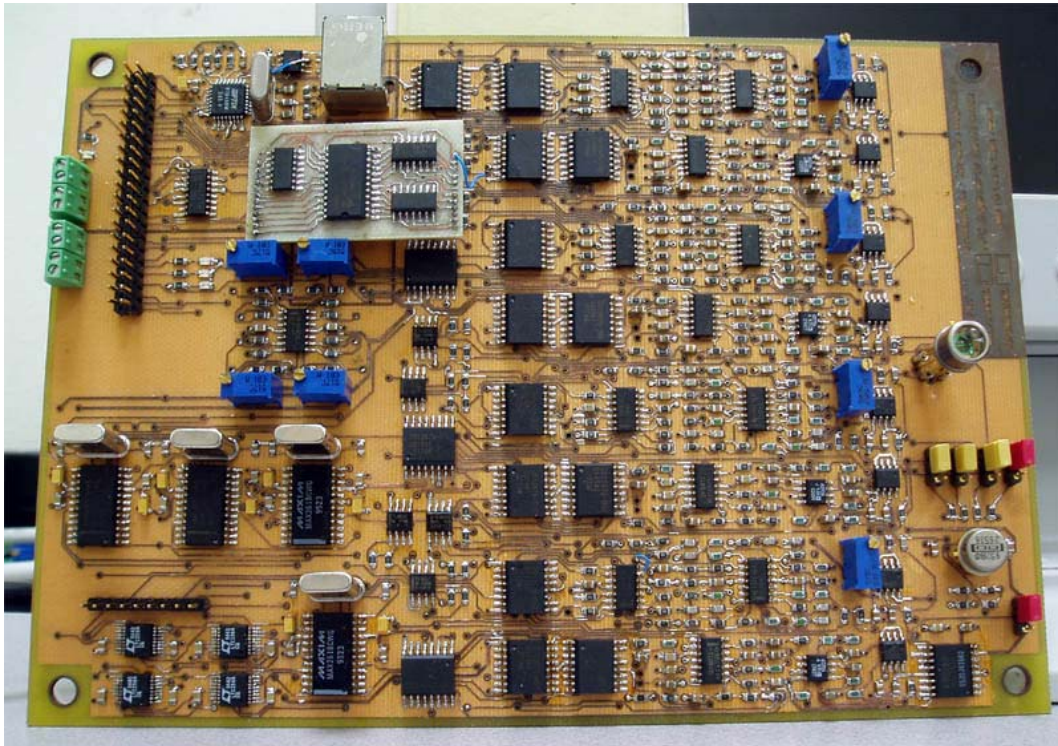


Figura 5. Circuito a cuatro capas diseñado y montado por un alumno en su PFC.

#### 4. Montaje de Circuitos BGA.

La necesidad del incremento progresivo en el número de pines en los circuitos actuales por encima de los 200 pines, ha ocasionado que los encapsulados tradicionales que utilizan interconexiones periféricas como QFPs (Quad Flat Packs), SOICs (Small Outline Integrated Circuits), TSOPs (Thin Small Outline Packages), SSOPs (Shrink Small Outline Packages) y PLCCs (Plastic Leaded Chip Carriers) han llegado a sus límites prácticos, por lo que poco a poco se han ido imponiendo los encapsulados basados en la interconexión de un array bidimensional, ya que permiten un mayor número de interconexiones en el mismo espacio. El encapsulado BGA (Ball Grid Array) [2,3] es la implementación más común que utiliza este mecanismo, siendo típicos los encapsulados con más de 100 pines. También se impone el CSP (Chip Scale Packages) en circuitos con menos de 100 pines debido a su bajo coste.

Todos los encapsulados con interconexiones periféricas son capaces de ser montados fácilmente en los circuitos impresos, ya que los pines son accesibles para la inspección de las soldaduras efectuadas y la reparación de estos circuitos no requiere grandes inversiones en equipamiento, siendo factible ésta con una sencilla estación de soldadura/desoldadura de aire caliente que podemos encontrar en una gran cantidad de laboratorios universitarios.

La introducción del encapsulado BGA sí presenta un reto importante para los desarrolladores de hardware, a la hora de montar los prototipos, ya que las soldaduras que no están en los bordes del

encapsulado están fuera de vista y no pueden ser inspeccionados visualmente para verificar su calidad o confirmar sus defectos. El posicionamiento de estos componentes no se puede realizar con el equipamiento clásico que encontramos en nuestros laboratorios, ya que se requiere tradicionalmente de una estación con sistema óptico específico que permita la alineación y la posterior colocación de forma automática, lo que significa una inversión alrededor de 20.000 €

Si embargo por muy bien que se haga el posicionado del BGA, los defectos de soldadura suelen ser inevitable en un gran número de ocasiones (circuitos abiertos y cortos entre bolas). Estos defectos tienen que aislarse y ser confirmados antes de reparar ya que la reparación del BGA es cara y arriesgada. Hoy en día el único medio fiable para la detección de fallos es el empleo de un equipo de rayos-x, cuyo coste únicamente se justifica en una línea de producción.

El BGA es normalmente un componente caro y normalmente tiene que ser limpiado después de quitarlo de la placa. Este proceso se puede realizar con un desoldador de aire caliente y la limpieza de los pads se puede realizar con la aplicación de un soldador y malla de cobre que recoja el estaño sobrante. Existe un riesgo significativo de tener que desechar todo el prototipo al producirse un daño irreparable en el circuito impreso.

En la Figura 6 se presenta el montaje de una FPGA Spartan3 de Xilinx con encapsulado BGA de 456 pines, con un paso entre bolas de 1,00 mm. Para su montaje se ha requerido la fabricación de un circuito impreso de 6 capas para poder tener acceso a todas las señales internas. En el diseño de los pads se han seguido las recomendaciones del fabricante del componente, consistentes en pad de 0,4mm, vías entre pads con taladros de 0,3mm con coronas de 0,6mm y pistas de 0,127mm (5 mil) (Fig 6.a). Para la dosificación de la pasta de soldadura se fabricó un mini-stencil sobre polímero de 125 µm con aberturas de 0,4mm. Para evitar el corto entre bolas del BGA y las vías intermedias entre los pads se fabricó otra máscara en el mismo polímero con aberturas también circulares de aproximadamente 0,7mm que se montó bajo el BGA (Figuras 6.b y 6.c) que además cumplen la función de evitar el desplazamiento lateral del componente lo que dificulta que se aparezcan cortos entre bolas. Una vez realizado el proceso de soldadura en horno de refusión con los parámetros de temperatura recomendados se consiguió la correcta conexión de las 456 bolas. Actualmente se están realizando pruebas de interconexión con diferentes tipos de BGA con objeto de caracterizar el proceso de soldadura.

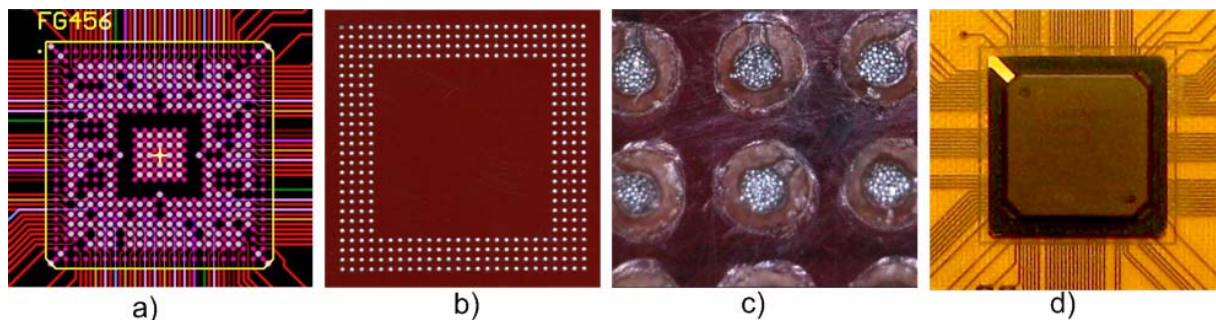


Figura 6. Proceso de montaje de una FPGA Spartan3 con encapsulado BGA de 456pines

## 5. Conclusiones

El sistema de fabricación de circuitos impresos mediante fresado en combinación con un banco de metalizado, ha demostrado ser medio eficaz para la fabricación de prototipos de mediana a alta complejidad, a un costo razonable y con un tiempo de fabricación medio entre 24 y 48 horas. Una vez lograda la adecuada formación del personal operario, se alcanza un nivel de calidad en el producto final más que aceptable para la inmensa mayoría de nuestras necesidades en docencia e investigación.

La fabricación de circuitos simple cara o doble cara metalizados hasta clase 3, salvo errores del operario en alguna de las fases del proceso, se consiguen fabricar con éxito prácticamente en el 100% de los casos. Los circuitos a cuatro capas de hasta clase 4, que cumplan con las recomendaciones de diseño, consideramos aceptable una tasa de acierto entre el 80% y 90%. Para circuitos de 6 y 8 capas de clase 5, debido a la complejidad del proceso es difícil conseguir una tasa de acierto superior al 60%.

En el caso de montaje de componentes BGA, la probabilidad de realizar un montaje incorrecto del componente es elevada, incluso en las empresas especializadas. En este caso, tener a disposición una estación de montaje adecuada que nos permita realizar la alineación adecuada de los componentes con ciertas garantías, conjuntamente con la disponibilidad de un laboratorio completo que permita desoldar los componentes mal soldados y que posibilite el *reballing* de éstos, actúa sin lugar a dudas, como un elemento dinamizador en la productividad científica de nuestros alumnos e investigadores al disminuir drásticamente la problemática del montaje y test de diseños complejos.

La disponibilidad de este laboratorio está permitiendo que alumnos de distintas asignaturas puedan completar trabajos de cursos además de permitir que muchos de los PFC que se dirigen dentro del IUMA puedan completarse en un plazo corto y a un coste muy inferior al que se requeriría al tener que fabricar los circuitos impresos en península.

## Referencias

- [1] [www.lpkf.com](http://www.lpkf.com)
- [2] K. Gilleo. *Area Array Packaging Handbook*. McGraw –Hill Publishing (2001).
- [3] N.C. Lee. *Reflow Soldering Processes and Troubleshooting: SMT, BGA, CSP, and Flip Chip Technologies.*, Newnes (2002).