

# Sustitución de la aleación Sn/Pb por una aleación libre de plomo en fabricación de circuito impreso



Proyecto final de carrera realizado por: **Juan José Hernández Rodríguez**  
Titulación: **Enginyeria de Materials**  
Curso: **2009 / 2010**  
(UAB)



## ÍNDICE

1.- Presentación de EUROCI	6
2.- Breve descripción del proceso de fabricación	6
3.- Problemática inicial y objetivo del proyecto	10
4.- Punto de partida. Breve explicación del proceso HASL	12
5.- Comparación de los diagramas de fase (Sn/Cu) y (Sn/Pb)	15
6.- Problemas de calidad con la aleación Sn/Cu. Amfe de proceso y plan de control	18
6.1.- Diferencias en problemas de calidad entre ambas aleaciones (Sn/Pb) vs (Sn/Cu)	20
6.1.1.- Delaminación del material y mala adherencia de las protecciones (Causa: alta temperatura de estañado)	20
6.1.2.- Mala mojabilidad, (Causa: combinación alta concentración de cobre y poco espesor)	21
6.1.3.- Interrelación entre aumento de concentración de cobre y la temperatura. Importancia en el proyecto	21
6.2.- Aumento de concentración de cobre en la cuba. Problemática. Estudio para su control	21
6.2.1.- Método óptimo para el control de la concentración de cobre en la cuba	23
6.2.1.1.- Adición de estaño puro para completar pérdidas de aleación (Sn/Cu)	23
6.2.1.2.- Refresco de la aleación	24
6.2.1.3.- Extracción de producto rico en cobre	25
6.2.1.4.- Combinación de los tres métodos anteriores (Método óptimo)	26
6.2.1.5.- Conclusiones	26
6.2.1.6.- Determinación del rango necesario para la concentración de cobre y del espesor	26
6.2.1.7.- Fundamento teórico de la influencia del espesor y de la concentración de cobre	27
6.2.1.8.- Aseguramiento de la calidad. Método de control del cobre, y del espesor	27
6.2.1.8.1.- Control del espesor	28
6.2.1.8.2.- Control del cobre y cálculo de adiciones (método 2: Refresco de la aleación)	28
6.2.1.8.2.1.- (1) Desarrollo de la aplicación informática	30

6.2.1.8.2.2.- (2) Evolución de la concentración del cobre en producciones reales.....	30
6.2.1.8.2.3.- (3) Influencia en la concentración de cobre en la aleación vs adiciones de estaño.....	31
6.2.1.8.2.4.- (4) Conclusiones e integración de los apartados (2) y (3).....	31
6.2.1.8.2.5.- (5) Aplicación informática para cálculo adiciones de estaño.....	32
6.2.1.8.2.6.- (6) Validación del estudio.....	36
6.2.1.8.2.7.- (7) Conclusiones.....	39
7.- Estudio de otras variables que influyen en el proyecto.....	40
7.1.- Mantenimiento preventivo de las máquinas.....	40
7.1.1.- Limpieza de cuchillas y de las guías.....	40
7.1.2.- Cabina de trabajo.....	40
7.1.3.- Parte superior de la cámara (sonda de temperatura).....	40
7.1.4.- Parte inferior de la cámara (zona turbina y bomba).....	40
7.2.- Desalojo de aceite (procedimiento de trabajo para evitar riesgo de incendio).....	41
7.3.- Elección de un flux adecuado.....	41
7.4.- Control de proceso por los operarios: Definición de los parámetros de proceso (HASL).....	41
7.5.- Control de calidad por los operarios: Autocontrol.....	41
8.- Impacto medio ambiental y efecto sobre la salud humana.....	42
8.1.- Efecto del plomo sobre la salud humana.....	42
8.2.- Impacto medio ambiental.....	43
8.2.1.- Impacto sobre la vegetación.....	43
8.2.2.- Impacto sobre los animales.....	43
8.2.3.- Impacto sobre el agua.....	43
8.2.4.- Impacto del plomo sobre el aire.....	44
8.2.5.- Impacto sobre el suelo.....	44
9.- Estudio económico general.....	45

9.1.- Reducción en costes de no calidad derivados de reclamaciones de cliente.....	45
9.2.- Reducción en costes derivados del control del proceso.....	45
9.3.- Optimización en los consumos de aleación.....	46
9.4.- Reducción de otros costes directos e indirectos.....	46
10.- Conclusiones finales del proyecto.....	47
11.- Agradecimientos.....	48
12.- Bibliografía.....	49
Anexo 1: Descripción de los acrónimos y siglas utilizados en el proyecto.....	50

## 1.- Presentación de EUROCI

El proyecto aquí descrito ha sido realizado en la empresa EUROCI y ha tenido una duración aproximada de nueve meses. Se inició en junio del año 2009 y se ha dado por finalizado en marzo del 2010.

EUROCI está ubicada en Barberà del Vallès (Barcelona), y se dedica a la fabricación de placas de circuito impreso principalmente para el sector de la automoción, aunque también en menor medida para la electrónica de consumo, (telefonía, televisión, aparatos eléctricos y electrónicos).

Se trata de una de las compañías más importantes en este sector que existen en Europa, destacando entre otros aspectos por la labor realizada en materia de (I+D+i), necesaria para continuar siendo una empresa competitiva en un mercado cada vez más exigente.

En la siguiente dirección se puede acceder a más información sobre la compañía.

[www.eurocir.com](http://www.eurocir.com)

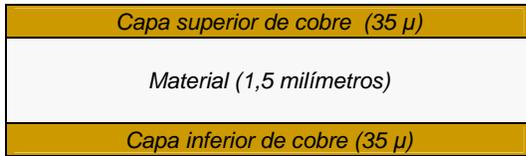
## 2.- Breve descripción del proceso de fabricación

A continuación se hace una explicación muy resumida del proceso de fabricación de placas de circuito impreso, para que el lector tenga unas nociones básicas que faciliten la comprensión del proyecto.

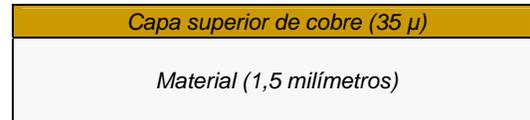
La materia prima recibida son planchas de material compuesto, (plástico, fibra de vidrio, papel prensado, resinas), de poco más de un milímetro de espesor, recubiertas por una fina lámina de cobre de varias micras, que puede estar por un lado (mono cara) o a ambos lados (doble cara). Estas planchas son cortadas en paneles más pequeños con unas medidas (ancho y largo) en función del tamaño del circuito que se quiera fabricar. El material base puede tener varios niveles de calidad y el cobre puede ser electrolítico o laminado, así como diversos espesores estandarizados.



*Panel cortado a medida a partir de la plancha*



*Ejemplo de materia prima doble cara  
(Sección transversal)*



*Ejemplo de materia prima mono cara  
(Sección transversal)*

Sobre los paneles se realizan diferentes operaciones hasta obtener finalmente el circuito impreso acabado. Existe una gran cantidad de posibilidades, muy complejas, que dependen de la tecnología que se quiera fabricar y del acabado para proteger el cobre. Ejemplos de tecnologías son (SCO), (PTH), (STH), y ejemplos de acabados son el estañado por inmersión, acabado níquel/oro, o el pasivado orgánico.

La primera operación importante de la fabricación consiste en una primera impresión seguida de un grabado, donde se elimina el cobre de unas zonas concretas en función del diseño del circuito.

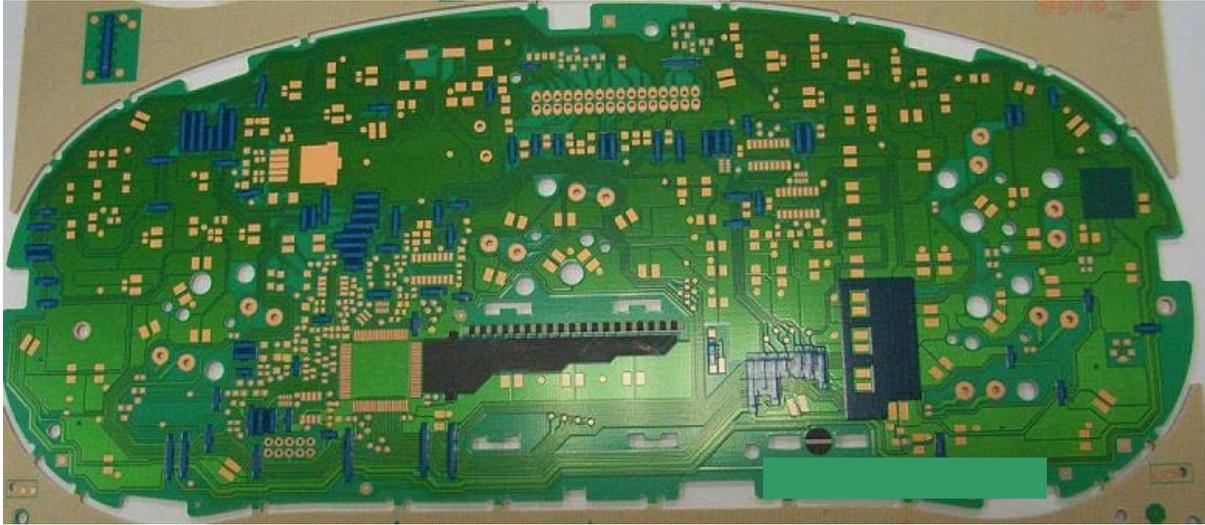


*Ejemplo de panel grabado (Obsérvense zonas donde se ha eliminado el cobre y zonas donde no ha sido eliminado)*

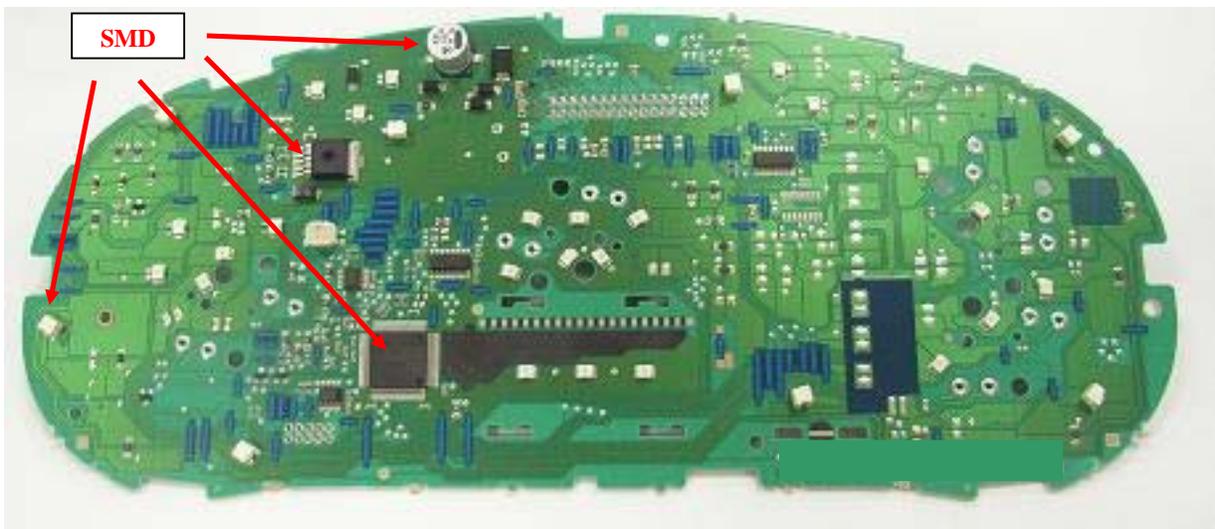
Las siguientes fases de producción son en resumen, impresiones de tintas conductoras como las de grafito o plata, impresiones de tintas no conductoras como las mascarillas o las protecciones, pulidos, curado en horno de la tinta, que puede ser parcial o al 100%, mecanizados en prensa, mecanizados en control numérico, acabados para proteger el cobre como por ejemplo el estañado por inmersión o el pasivado con un producto orgánico (OSP), entre otros.

El aspecto más importante del proceso de fabricación necesario para entender este proyecto, es que en todos los circuitos hay unas zonas de cobre sobre las cuales el cliente soldará sus componentes (SMD), y que debe ir protegida mediante un acabado para evitar la corrosión. Este proyecto se centra en el estudio de la sustitución del acabado estañado por inmersión con una aleación con plomo, por otra libre de plomo.

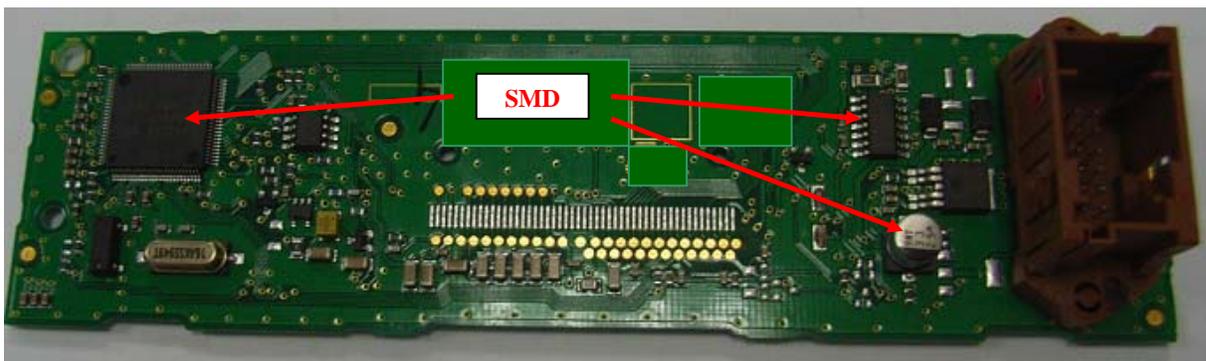
A continuación se presentan varias fotografías de circuitos impresos acabados tal y como salen del proceso, y de circuitos con los componentes electrónicos (SMD) ya soldados por los clientes sobre las superficies de cobre correspondientes.



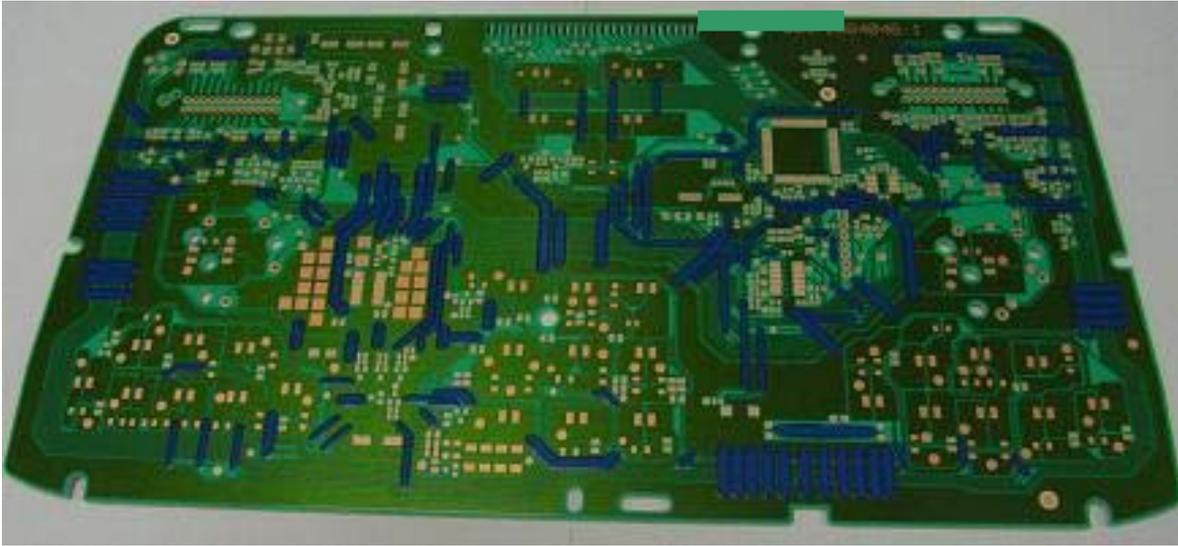
*Circuito sin los (SMD) soldados por el cliente*



*El mismo circuito que el de la fotografía anterior pero con los (SMD) soldados por el cliente*



*Ejemplo de otro circuito con los (SMD) soldados por el cliente*



*Otro ejemplo de circuito sin los (SMD) soldados por el cliente*

### 3.- Problemática inicial y objetivo del proyecto

Uno de los acabados más utilizados en la fabricación de placas de circuito impreso, con la finalidad de proteger de la corrosión las zonas de cobre sobre las que el cliente realizará la soldadura de sus componentes electrónicos (SMD), es el estañado por inmersión en una aleación estaño/plomo con la composición del eutéctico, (Sn63/Pb37).

Las aleaciones con plomo llevan utilizándose para soldadura desde hace décadas, ya que además de tener un precio inferior en comparación con otras aleaciones, ofrecen ventajas particularmente importantes para las aplicaciones en el sector de la electrónica y para su procesado, como por ejemplo baja temperatura de fusión, resistencia a la fatiga, o conductividad eléctrica, entre otras.

La utilización de esta aleación rica en plomo se vio seriamente afectada por la conocida como directiva (RoHS), que entró en vigor en el año 2006 y restringió el uso de este y otros elementos tóxicos en determinadas aplicaciones y sectores. El sector de la automoción está exento de esta prohibición, por lo que actualmente la utilización de la aleación con plomo está todavía permitida.

Esta situación obligó a las empresas fabricantes de circuitos para los sectores afectados, a buscar otras aleaciones similares pero libres de plomo y adaptar el proceso de fabricación para poder aplicarlas, o bien a utilizar otros acabados ya existentes, cada uno de ellos con su tecnología correspondiente.

Ejemplos de estos acabados alternativos son el acabado níquel/oro (Ni/Au), plata química, o el pasivado orgánico (OSP). Todos tienen sus ventajas e inconvenientes, aunque no es objetivo de este proyecto realizar una comparativa entre ellos. Lógicamente tenían y siguen teniendo su cuota de mercado, ya que en función del sector, condiciones de aplicación, legislación, etcétera, así lo requiere.

No obstante, las ventajas del proceso de estañado por inmersión son suficientemente importantes en comparación con el resto de acabados, como para no ser razonable su sustitución por alguno de éstos. En consecuencia fue completamente necesario principalmente por razones económicas y tecnológicas, desarrollar una aleación similar a la utilizada hasta entonces pero que se adaptase a los requisitos legales, utilizando el mismo proceso o tecnología de aplicación.

La investigación llevada a cabo por las empresas y por los proveedores de las aleaciones, llegó a la conclusión que la aleación (Sn/Cu) de composición eutéctica, es decir 99,3% de estaño y 0,7% de cobre era una de las aleaciones que podrían hacer esta función.

En el momento de iniciarse el presente proyecto, la organización estaba utilizando industrialmente esta aleación libre de plomo (Sn/Cu), ya que era imprescindible para determinados sectores, pero el estudio para la sustitución e industrialización de esta aleación había sido muy poco desarrollado, lo que provocaba frecuentes reclamaciones de los clientes con costes muy elevados, exceso de merma interna, paros de línea, averías de maquinaria, o excesivo consumo de materias primas.

El sector de la automoción está regulado por una legislación muy compleja, destacando la directiva (EDL) de entre la diversa legislación que afecta a la problemática aquí tratada. Como se ha indicado anteriormente, a día de hoy está permitida la utilización de la aleación con plomo, pero se prevé que deje de estarlo cuando expiren los plazos que todavía permiten su utilización en el sector de la automoción.

Además, debido a la sensibilización con la protección del medio ambiente, y que esto forma parte de la estrategia comercial por parte los productores de automóviles, cada vez más nos encontramos que los clientes solicitan acabados libres de plomo, a pesar de que a día de hoy todavía pueden utilizarse.

Esta problemática también se dio en otras empresas de la competencia, por lo que la consecución del objetivo planteado en este proyecto se constituyó como algo estratégico para la organización, que en caso de conseguirlo, le permitiría continuar siendo una de las compañías más competitivas a nivel internacional.

Actualmente se están desarrollando nuevas y mejores aleaciones libres de plomo y con mejores prestaciones. Por ejemplo, la aleación (Sn/Cu/Ni) ofrece mayor estabilidad en el proceso además de trabajar a una temperatura inferior, aproximadamente a unos 20°C menos con respecto a la aleación (Sn/Cu).

No obstante, este proyecto se centró en conseguir industrializar de manera óptima el proceso con la aleación de (Sn/Cu), lo que suponía un avance muy importante.

No se descarta en un futuro a corto plazo la utilización de otras aleaciones mejores, aunque se ha llegado a la conclusión que es imprescindible asegurar en una primera etapa el desarrollo y optimización del proceso (HASL) con la aleación (Sn/Cu), para poder realizar en una etapa posterior, y en caso que así se decida, su sustitución por otra aleación como por ejemplo la de (Sn/Cu/Ni).

Creemos que el estudio que haría falta para esta segunda etapa sería relativamente sencillo si hemos sido capaces de afianzar la primera, y en definitiva si alcanzamos los objetivos deseados.

En resumen, el objetivo del proyecto es realizar el estudio necesario para conseguir industrializar el proceso con la aleación (Sn<sub>99,3</sub>/Cu<sub>0,7</sub>), optimizándolo todo lo posible, partiendo de la base que en el momento de iniciar el proyecto ya se estaba utilizando dicha aleación, por lo que se partía de unos conocimientos y experiencia adquirida previamente.

De manera general, los objetivos parciales del proyecto son los siguientes,

- Conocer las propiedades físicas y químicas de la nueva aleación (Sn/Cu), de la aleación (Sn/Pb), y entender las diferencias entre ambas (estudio de sus diagramas de fases).
- Conocer el comportamiento de la aleación (Sn/Cu) en el proceso de fabricación.
- Identificar las diferentes variables de proceso que intervienen, así como establecer el rango de trabajo óptimo.
- Realización del (AMFE) (1), y desarrollo del Plan de Control (2) para el proceso.
- Desarrollar el procedimiento de trabajo por los operarios.
- Definir las operaciones de mantenimiento preventivo necesarias a la maquinaria.

Con el objetivo final de

- Industrializar de manera óptima el proceso de estañado por inmersión (HASL) con la nueva aleación (Sn/Cu)

*(1) y (2) Se realiza una explicación en el apartado 6 de este proyecto.*

Y todo esto teniendo en cuenta

- Minimizar el impacto medio ambiental derivado de nuestro proceso y del uso de los materiales.
- Cumplir la normativa y legislación medio ambiental.
- Optimizar y minimizar los costes de materias primas (consumo de aleación y de estaño puro, consumo de productos químicos como los fluxes, y consumo energético)
- Asegurar el cumplimiento de los requisitos del cliente, (aseguramiento de la calidad), reduciendo todo lo posible las reclamaciones de calidad por los clientes. (3) prioritario
- Minimizar la merma interna y costes de no calidad.
- Estabilizar y controlar el proceso, minimizando paros y averías.

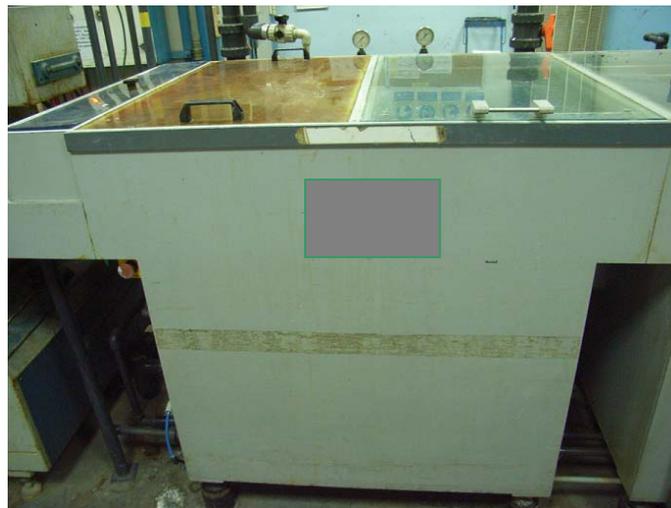
(3) Se hace referencia en varios apartados, justificando el por qué es prioritario para el proyecto.

#### 4.- Punto de partida. Breve explicación del proceso HASL

En el momento de iniciar este proyecto ya se estaba realizando en EUROCI el proceso de estañado con la aleación (Sn/Cu) conocido como (HASL), además del proceso con la aleación (Sn/Pb). Es decir, se utilizaba una u otra aleación en función del sector y de los requisitos del cliente para el circuito procesado.

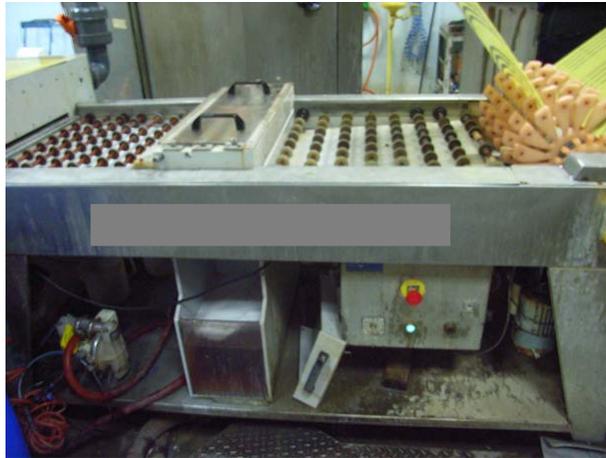
A continuación se hace una breve descripción específica del proceso industrial de estañado, que es similar independientemente de la aleación utilizada.

Los paneles se incorporan mediante un cargador automático a la línea de micro ataque, donde la superficie de cobre es atacada químicamente para eliminar el óxido. Esto hace perder algunas micras en el espesor del cobre.



*Fotografía de los módulos de microataque*

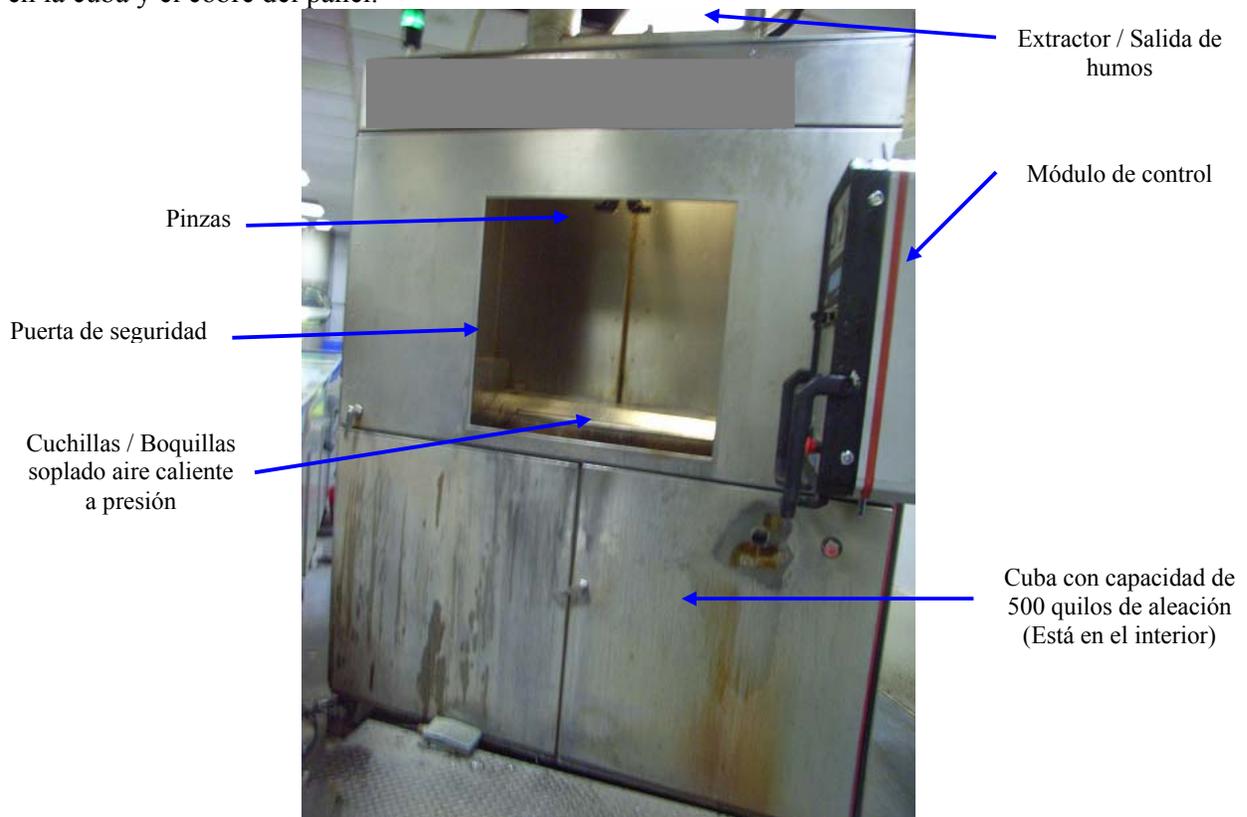
Posteriormente los paneles pasan por varios módulos de enjuague con agua de red y agua desionizada, para a continuación, pasar a través de unos rodillos donde se impregnan de un flux, (producto químico corrosivo), que activa químicamente la superficie del cobre.



Fotografía módulo de fluxado

Una vez fluxado el panel, el operario lo coge manualmente y lo fija en unas pinzas que están posicionadas en la parte superior de la máquina de estañado. Esta máquina consiste principalmente en una cuba con una capacidad de 500 quilos situada en la parte inferior, en la que se mantiene la aleación a una temperatura unos 60°C por encima de su temperatura de fusión, y con recirculación interna de la aleación a través de unas bombas para intentar la máxima homogeneización.

Cuando el operario pone el panel en las pinzas, el panel queda perpendicularmente a la superficie de la cuba. Una vez el operario pulsa el botón de marcha descendiendo una puerta de seguridad, y a continuación descenden las pinzas automáticamente hasta introducir el panel durante unos segundos en el interior de la aleación, de manera que se realiza soldadura entre la aleación que está en la cuba y el cobre del panel.



Fotografía de la máquina HASL

Transcurridos unos segundos las pinzas vuelven a ascender hasta la posición inicial, pero durante el ascenso y a través de las boquillas de unas cuchillas que soplan aire caliente a presión, dejan un espesor de varias micras de aleación sobre el cobre. En el resto de zonas del panel donde no hay cobre quedan intactas, es decir sin cubrirse de aleación; no obstante todo el panel ha recibido un choque térmico. A continuación y una vez se abre la puerta de seguridad, el operario retira el panel manualmente y lo introduce en un módulo donde los paneles son enfriados con agua, pasando automáticamente a un módulo lavado y posteriormente a uno de secado, hasta llegar al final del proceso, que es un descargador automático que pone los paneles sobre un palet.



*Fotografía de los módulos de enfriamiento y lavado*

Aunque la tecnología es similar para ambas aleaciones, los problemas que se pueden producir con una u otra aleación, el tipo de flux utilizado, las variables de proceso necesarias, como temperaturas, presiones, tiempos de inmersión, orientación boquillas, velocidad, etcétera, son muy diferentes y más complejos de lo que a primera vista podría parecer.

El hecho de que en la organización ya se estuviese trabajando desde hacía algún tiempo con la aleación libre de plomo, implicaba necesariamente que se habían establecido unos parámetros de trabajo que permitían que el proceso se llevase a cabo, aunque con frecuentes problemas y dificultades.

Debido a la complejidad del proyecto y de la imposibilidad de estudiar paralelamente las diferentes variables que intervienen, se identificó como objetivo prioritario el asegurar la calidad del producto fabricado, reduciendo todo lo posible los problemas de calidad y en consecuencia las reclamaciones de los clientes. (\*) Prioritario.

El estudio para la consecución de esta exigencia implicaba indirectamente alcanzar el resto de objetivos, ya que hay una fuerte interrelación entre todas las variables que intervienen.

Para la realización del proyecto ha sido necesaria la colaboración de un equipo multidisciplinar, así como los conocimientos y experiencia previa de la organización en este proceso. De igual modo se ha necesitado la colaboración del laboratorio de la empresa suministradora de la aleación (Sn/Cu), así como del departamento de física, y del servicio de análisis química de la (UAB).

## 5.- Comparación de los diagramas de fase (Sn/Cu) y (Sn/Pb)

En este apartado se presentan los diagramas de fase binarios correspondientes a las dos aleaciones.

Estos diagramas son una herramienta que aporta información sobre la estructura y composición de las diferentes fases, en función del porcentaje total de cada elemento y de la temperatura, suponiendo que se trabaja en condiciones de equilibrio.

No es objetivo realizar una explicación detallada de estos dos diagramas, ya que para el desarrollo del proyecto sólo nos interesaba principalmente la temperatura de fusión, y cómo varía ésta al modificarse las concentraciones.

Por tanto, en el diagrama de fases del (Sn/Pb) observamos que para la composición eutéctica la temperatura de fusión es de 183°C.

Por lo que respecta a la aleación Sn/Cu, e igualmente para la composición eutéctica que en este caso es (99,3Sn/0,7Cu), la temperatura de fusión es de 227°C, es decir, 44°C superior a la aleación Sn/Pb.

Experimentalmente conocemos que las temperaturas a las que se deben mantener las aleaciones en la cuba, deben ser aproximadamente de 245°C para la aleación (Sn/Pb), y de 280°C para la de (Sn/Cu), ya que al tratarse de un proceso industrial hay variables que deben tenerse en cuenta; a continuación se indican las más importantes,

- La introducción de paneles en la cuba provoca una disminución de la temperatura, tanto más cuanto mayor sea el tamaño del panel.
- Hay pérdida de calor por conducción a través de las paredes de la cuba.
- La temperatura ambiente también influye, con pérdida de calor por convección.
- La homogeneización de la aleación no es perfecta, conocemos que tanto la composición como las temperaturas no son exactamente iguales en toda la cuba.
- La recirculación y homogeneización mejora cuanto mayor es la temperatura.
- Cuanto mayor es la temperatura mayor es el choque térmico sobre el panel, con efectos negativos en la calidad.
- Existe un problema de calidad importante conocido como “estaño frío”, que se produce cuando las temperaturas son bajas. La temperatura a la que se produce este defecto es función de la escoria que pueda haber en la máquina, y de la contaminación de la cuba.

Si en estos diagramas de fase nos situamos en la composición eutéctica y a la temperatura de fusión, observamos otro de los aspectos fundamentales para el desarrollo del proyecto. Para la aleación (Sn/Pb), si nos desplazamos tanto hacia un lado como al otro del diagrama, las líneas de líquidus tienen una pendiente relativamente pequeña. En cambio para la aleación (Sn/Cu), si nos desplazamos en el diagrama hacia una mayor concentración de cobre, se puede ver que la línea de líquidus tiene una pendiente relativamente alta.

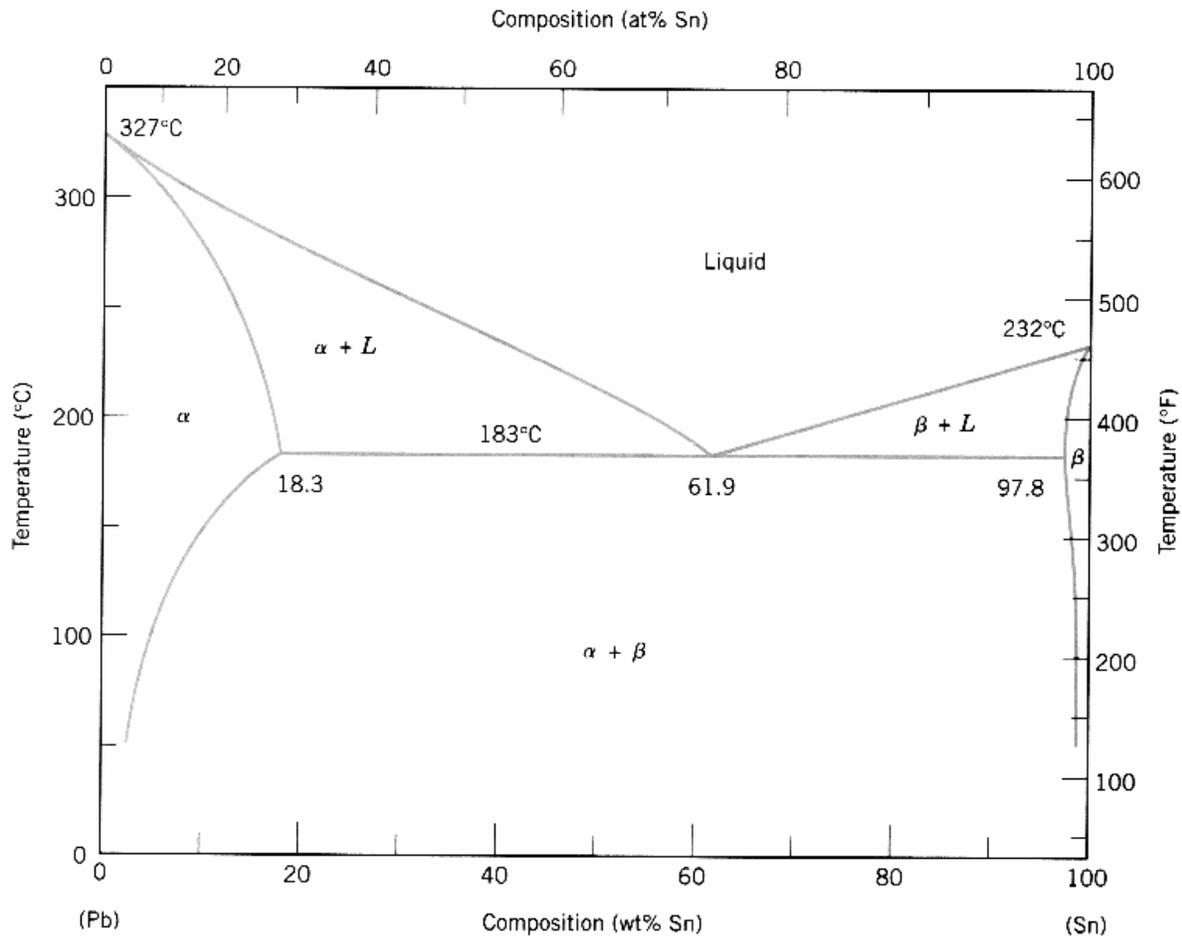
Esto es especialmente importante debido a que la superficie a estañar es de cobre, y por tanto la contaminación de la aleación en la cuba se produce por incorporación de pequeñas cantidades de cobre de cada panel, según avanza la producción. Sabemos experimentalmente que la aleación (Sn/Pb) se ve muy poco afectada por esta posible contaminación de cobre durante la producción, de manera que la temperatura a la que se mantiene la aleación de la cuba tiene muy pocas variaciones, siendo un proceso estable.

En cambio, la aleación (Sn/Cu) tiene una composición inicial de 0,7% de cobre, por lo tanto pequeñas cantidades adicionales de cobre tienen una incidencia relativamente grande, y si tenemos en cuenta que la temperatura de fusión aumenta al aumentar la concentración de cobre, hace que la temperatura de trabajo deba ser cada vez superior conforme va transcurriendo la producción. Una temperatura demasiado alta tiene unos efectos adversos muy importantes.

En apartados posteriores se hace una explicación y justificación detallada sobre este tema.

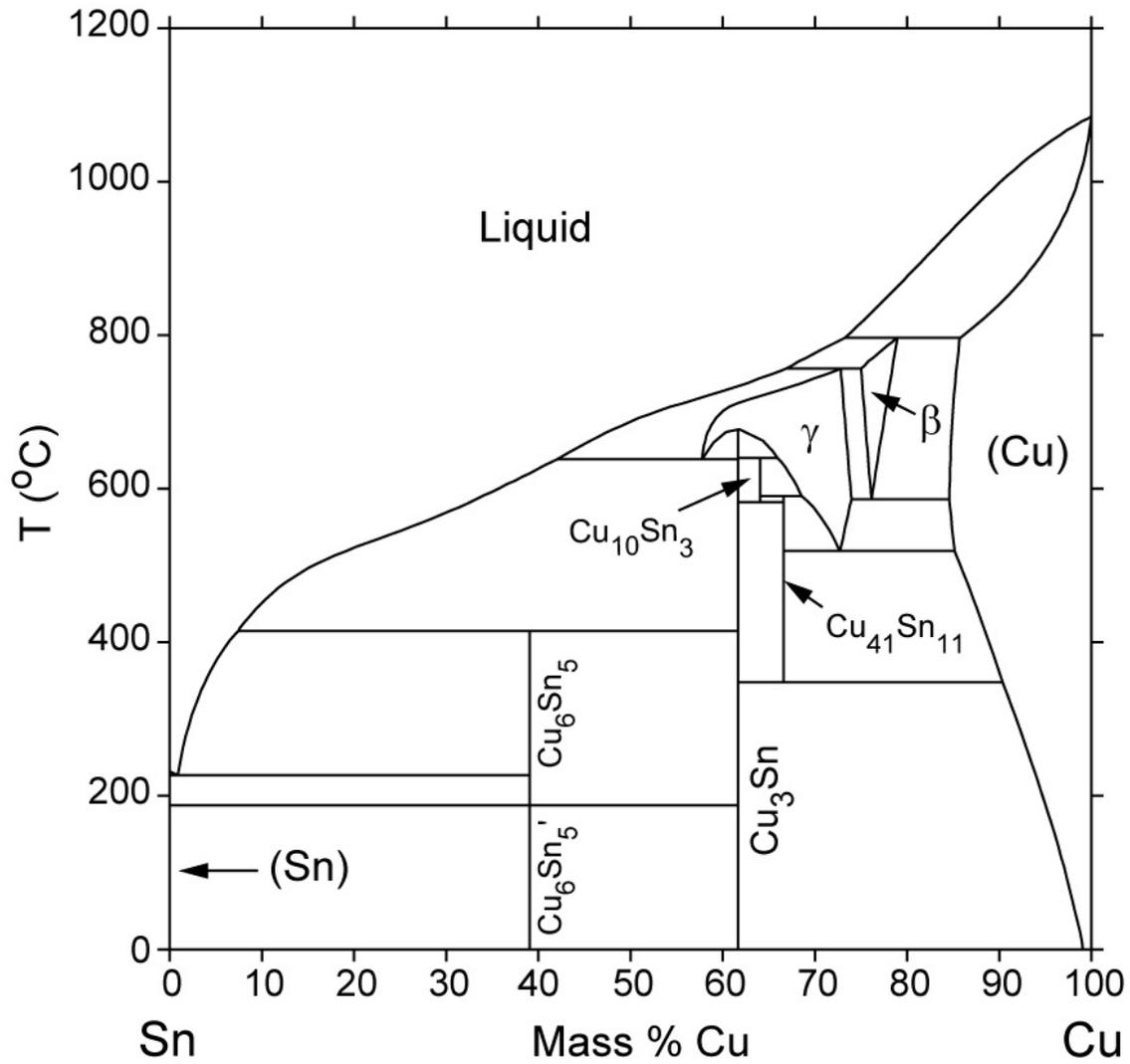
El estudio de estos diagramas de fase ha sido fundamental para el desarrollo del proyecto, ya que nos ha permitido entender cómo se comportan las dos aleaciones y ha ayudado a conocer cómo controlar el proceso.

Por último, también se ha podido comprobar la coherencia entre la información teórica que aportan estos diagramas de fase (condiciones de equilibrio e ideales), y lo observado en las condiciones reales de trabajo, con una aproximación muy alta.



*Diagrama de fases Sn/Pb*

La pendiente a ambos lados de la composición eutéctica es relativamente baja.



*Diagrama de fases Sn/Cu*

En este diagrama se puede apreciar la gran pendiente de la línea de líquidus al aumentar la concentración de cobre a partir de aproximadamente el 1%.

## 6.- Problemas de calidad con la aleación Sn/Cu. Amfe de proceso y plan de control.

El (AMFE) (Análisis Modal de Fallos y Efectos) es una herramienta de calidad muy utilizada, cuya función principal es identificar los diferentes modos de fallo (problemas de calidad), sus causas, así como la probabilidad de su ocurrencia, su gravedad, y la dificultad que tiene de ser detectado. Para la ocurrencia, gravedad y detección, se les asigna a cada una de ellas una puntuación de 1 a 10, de manera que cuánto mayor es este número mayor es la probabilidad que ocurra, la gravedad de su efecto, o la dificultad de ser detectada. Por ejemplo, un modo de fallo con una ocurrencia de 8 quiere decir que es muy probable que el defecto se produzca, una severidad de 2 implica que las consecuencias no son graves, y una detección de 5 quiere decir que su detección en el proceso no es trivial, pero que tampoco es extremadamente complicada. Para cada modo de fallo se calcula el (NPR) (Nivel de Prevención de Riesgo), que es el resultado de multiplicar los tres valores, en este caso  $8 \times 2 \times 5 = 80$ . Se establece un valor máximo de (NPR) aceptado, por encima del cuál hay que emprender acciones para mejorar alguna de las tres variables (reducir su puntuación), aunque prácticamente siempre será la ocurrencia y/o la detección, ya que no suele ser habitual poder actuar sobre la gravedad.

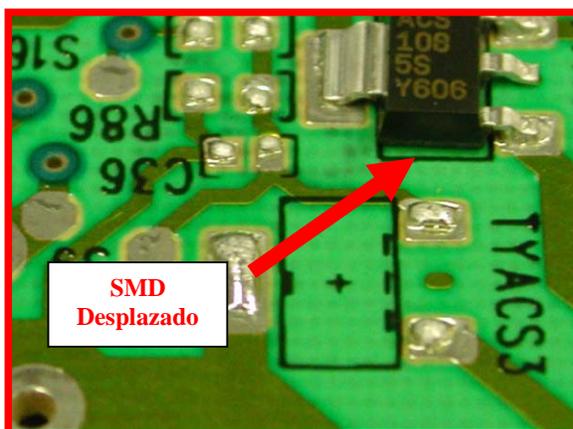
Otra herramienta que se utiliza en la gestión de la calidad y que se basa en el (AMFE), es el plan de control, donde se detalla cuáles serán los controles a realizar, su frecuencia, método de control, tolerancia, y plan de reacción, entre otra información, con el fin de establecer una sistemática que permita detectar durante la producción si el producto fabricado tiene alguno de los defectos identificados en el (AMFE), y en tal caso, aplicar el plan de reacción correspondiente.

La consecuencia de que se produzca un defecto, no se detecte, y que por tanto le llegue este producto defectuoso al cliente, es la materialización del fallo, fallo funcional.

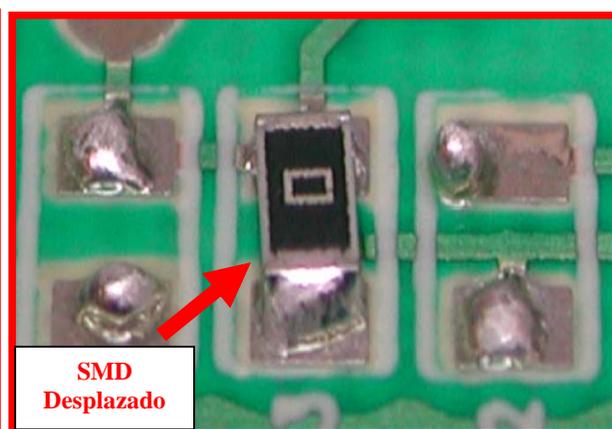
Los problemas de calidad más importantes que se producen en el proceso realizado por los clientes para circuitos con acabado libre de plomo (aleación Sn/Cu), son los tres siguientes, **problemas de soldadura en la inserción de los componentes (SMD)**, **problemas de mala adherencia de las protecciones** (que es un tipo de tinta no conductora), y **problemas de delaminación del material base**.

De estos tres problemas (modos de fallo), el más grave y que había generado reclamaciones con costes de no calidad muy elevados, era la inadecuada inserción de los componentes (SMD).

En las fotografías siguientes se presentan algunos ejemplos donde se puede observar el desplazamiento del componente, que puede ser lateral, pero también vertical.



*Defecto de inserción de componente*

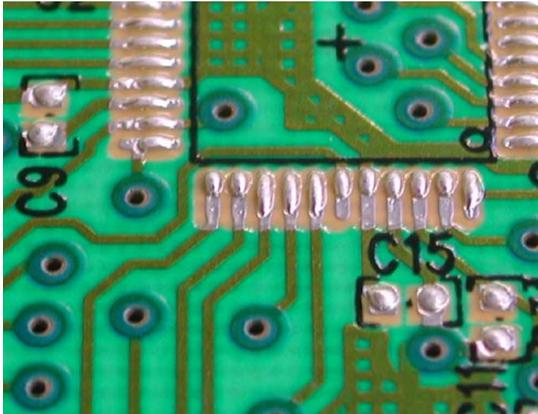


*Defecto de inserción de componente*

Durante la realización del proyecto se hizo un amplio estudio para determinar la causa que provocaba este modo de fallo. Para ello se analizaron piezas defectuosas, y se llegó a conocer toda la información relevante de las materias primas y condiciones de procesado gracias a la trazabilidad (4), determinándose que la causa primaria era la mala mojabilidad de la aleación (Sn/Cu). Cuando el cliente intentaba soldar los componentes (SMD) sobre los pads (superficie de cobre protegida por la capa de aleación Sn/Cu), ya sea por un proceso de ola de estaño o por el proceso de refusión, la aleación o pasta añadida por el cliente y que debía realizar la soldadura con la aleación (Sn/Cu) del circuito y con los contactos metálicos del (SMD), tendía a formar esferas, provocando que el componente se desplazase como se puede observar en las fotografías anteriores.

Para conocer durante la fabricación de los circuitos si la mojabilidad es correcta, se desarrolló un ensayo que consistía en simular el proceso de soldadura realizado por el cliente pero sin componentes (SMD), es decir comprobando si hay una correcta soldadura entre la aleación (Sn/Cu), incorporada mediante el proceso (HASL), y otra aleación o pasta similar a la utilizada por el cliente.

A continuación se presentan varias fotografías donde se puede ver cómo se manifiesta esta mala mojabilidad. La pasta o aleación que intentamos soldar sobre la aleación (Sn/Cu) tiende a formar una esfera o a desplazarse hacia un lado,



*Mojabilidad NOK*

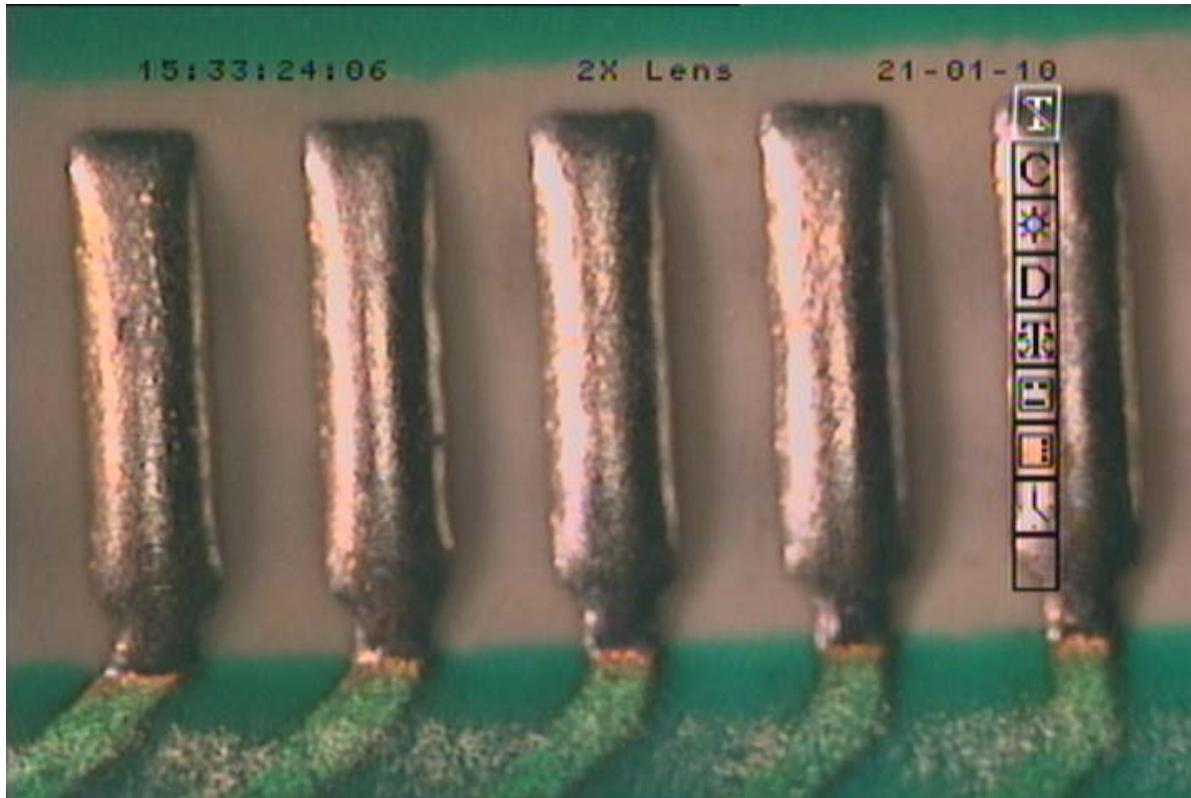


*Mojabilidad NOK*



*Mojabilidad NOK*

(4) Trazabilidad: Información indicada en el propio producto a partir de la cuál podemos ir conociendo todos los datos relativos a su producción y a las materias primas utilizadas.



*Mojabilidad OK*

El siguiente paso era identificar la causa por la que se producía la mala mojabilidad (causa primaria). Se determinó que básicamente era debido al efecto de la combinación de poco espesor de aleación (Sn/Cu) y por la alta concentración de cobre en la aleación existente en la cuba (causas secundarias).

Por lo que respecta a los problemas de delaminación del material y que salten las protecciones con la aleación (Sn/Cu), la causa primaria era la alta temperatura a la que se había sometido el panel en el proceso de (HASL), es decir al choque térmico.

Continuando con el análisis, se llegó también a la conclusión que la causa por la que la temperatura a la que se debía mantener la aleación (Sn/Cu) era cada vez mayor según avanzaba la producción, era a su vez debido por un aumento progresivo de concentración de cobre en la cuba.

## **6.1.- Diferencias en problemas de calidad entre ambas aleaciones (Sn/Pb) vs (Sn/Cu)**

### **6.1.1.- Delaminación del material y mala adherencia de las protecciones (Causa: alta Tª de estañado)**

El hecho de que la temperatura de trabajo con la aleación (Sn/Cu) sea de 280°C, y por tanto muy superior a los 245°C de la aleación (Sn/Pb), hace que los paneles se sometan a un mayor choque térmico.

Por lo que respecta al **problema de delaminación de la materia prima**, se ha detectado no obstante, que no se produce con la aleación (Sn/Cu) a los 280°C, sino a temperaturas superiores.

En el caso de la **mala adherencia de las protecciones** esto es igualmente debido a la alta temperatura. Este defecto se manifiesta porque la capa de tinta salta cuando el cliente manipula el circuito, produciéndose un fallo funcional.

Como se explica en los apartados siguientes, la temperatura a la que es necesario mantener la aleación (Sn/Cu) va aumentando a medida que se van estañando más paneles. Cuanto mayor es la temperatura, mayor es el choque térmico que sufre el panel, y por tanto la probabilidad que se produzcan estos defectos.

### **6.1.2.- Mala mojabilidad, (Causa: combinación alta concentración de cobre y poco espesor)**

Sabemos experimentalmente que con la aleación (Sn/Pb) se obtienen unos espesores superiores a los que se consiguen con la aleación (Sn/Cu), que para este segundo caso están normalmente entre 1 y 3 micras.

Por lo que respecta a la concentración de cobre, partimos inicialmente de una aleación eutéctica con 0,7% de cobre, pero su concentración va aumentando conforme se realiza la producción. Durante el proceso de estañado, el panel es introducido por inmersión durante unos segundos en la cuba donde está la aleación a una temperatura de unos 280°C. Por efecto de esta elevada temperatura, una pequeña cantidad de cobre de la superficie del pad del circuito es añadida, aumentando así la concentración de cobre en la cuba. Obviamente, la influencia de un panel sobre la concentración de la cuba es despreciable, pero al cabo de unos días de producción continuada, el aumento de la concentración es considerable.

### **6.1.3.- Interrelación entre aumento de concentración de cobre y la temperatura. Importancia en el proyecto.**

De acuerdo con el diagrama de fases, un pequeño aumento de concentración de cobre implica un aumento relativamente grande de temperatura, y el aumento de temperatura provoca a su vez que la cantidad de cobre añadido a la cuba sea cada vez mayor, dándose una situación inestable, que se alimenta por sí misma.

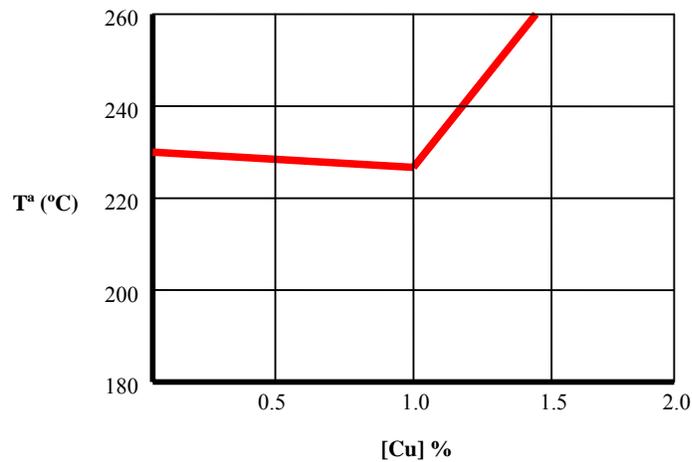
*El estudio de cómo controlar la concentración de cobre en la cuba durante la producción ha sido con gran diferencia la parte más importante del proyecto aquí explicado.*

A continuación se hace una explicación detallada de cómo se ha llegado a esta conclusión, y de cómo controlarla.

### **6.2.- Aumento de concentración de cobre en la cuba. Problemática. Estudio para su control.**

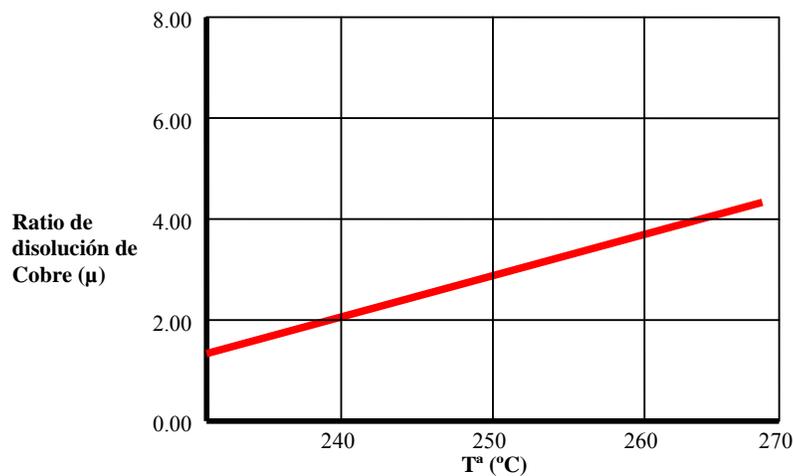
La concentración de cobre en la aleación aumenta a medida que se realiza la producción, aunque los problemas de calidad se manifiestan cuando su concentración supera el 1,1 %, debido a que es a partir de ese valor cuando se produce una interrelación muy fuerte con otras variables.

Una de estas variables es la temperatura de fusión, ya que a mayor concentración de cobre mayor es la temperatura de fusión necesaria, tal y como se puede observar en el diagrama de fases. Nótese en el siguiente diagrama que la necesidad de aumentar la temperatura se produce a partir de la concentración de cobre superior al 1%.



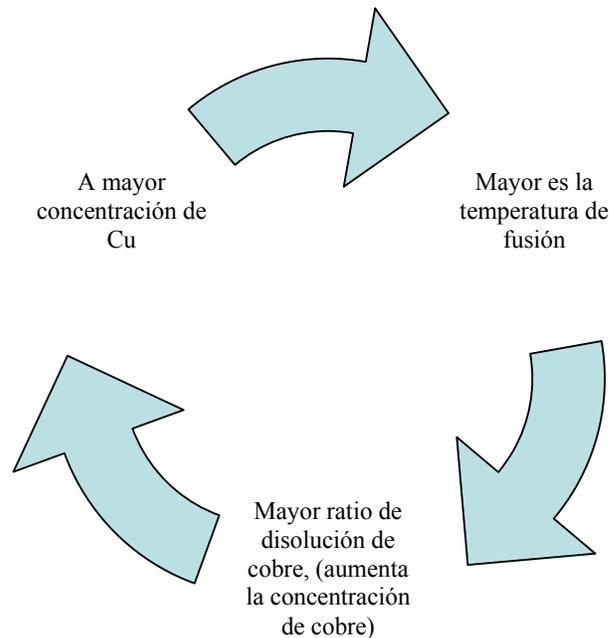
*Temperatura de fusión de la aleación en función de la concentración de cobre*

La necesidad de aumentar la temperatura afecta a su vez a otra variable, como el ratio de disolución de cobre, ya que a mayor temperatura de trabajo aumenta el ratio de disolución de cobre en la cuba, aunque en este caso de manera lineal.



*Ratio de disolución de cobre vs temperatura de la aleación Sn/Cu*

En conclusión, cuando la concentración de cobre supera el 1%, la temperatura de fusión de la aleación aumenta exponencialmente con el aumento de concentración, lo que implica a su vez un mayor ratio de disolución, y por tanto mayor aporte de cobre a la cuba, produciéndose una situación que por si misma se retroalimenta, y hace que el sistema sea inestable.



*Retroalimentación entre las variables concentración de cobre, temperatura aleación, y ratio disolución de cobre*

### 6.2.1.- Método óptimo para el control de la concentración de cobre en la cuba

Existen tres formas principales para reducir la concentración del cobre dentro del rango de trabajo deseado, optimizando así el proceso de estañado.

- 1) Rellenar con estaño puro las pérdidas de aleación (Sn/Cu).
- 2) Refrescar la aleación extrayendo parte de la aleación (Sn/Cu) contaminada, y reemplazándola por la misma cantidad de estaño puro.
- 3) Extracción del cobre aprovechando las diferentes densidades de los metales.

Cada uno de los tres métodos nos aporta una manera para ayudar a controlar la concentración, no obstante, como se podrá ver más adelante el proceso óptimo requiere la combinación de estas tres técnicas. A continuación se da una descripción de cada uno de los tres métodos.

#### 6.2.1.1.- Adición de estaño puro para completar pérdidas de aleación (Sn/Cu)

Durante la producción se va reduciendo la cantidad inicial de aleación (500 kg), ya que para cada panel estañado se incorpora una pequeña cantidad de aleación sobre la superficie de cobre, por lo que se debe ir reponiendo esta cantidad perdida.

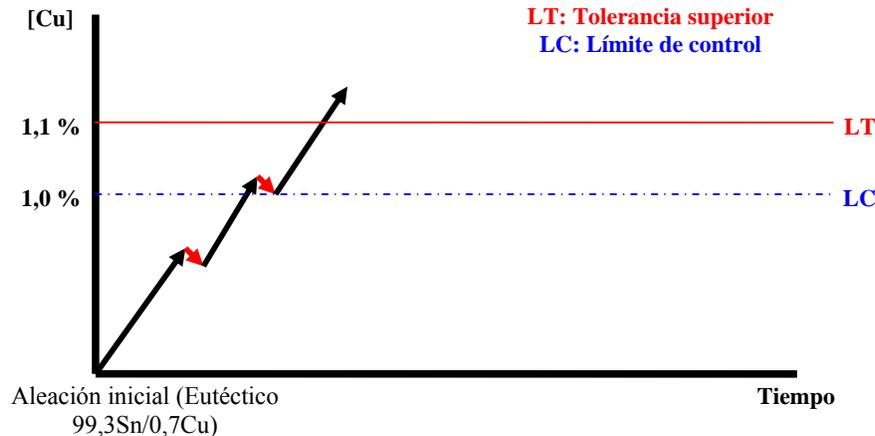
##### Ventajas

Método sencillo que únicamente requiere el paro de las bombas de recirculación para que la aleación fundida alcance su nivel real, y completar hasta el nivel máximo adicionando lingotes de estaño puro.

##### Desventajas

Con este método conseguimos reducir el aumento de concentración de cobre, pero no es suficiente para mantener esta concentración dentro del rango deseado a medio plazo.

La tendencia de la concentración de cobre en la cuba durante la producción en serie aplicando únicamente este método, se representa gráficamente a continuación.



*Evolución de la concentración de cobre con el tiempo aplicando únicamente este método*

### 6.2.1.2.- Refresco de la aleación

Si aceptamos la hipótesis de que la concentración de cobre es homogénea en la cuba, consiste en extraer una cantidad de aleación (Sn/Cu) y añadir la misma cantidad de estaño puro, reduciendo así la concentración de cobre en toda la cuba, suponiendo condiciones de homogeneización ideales.

#### Ventajas

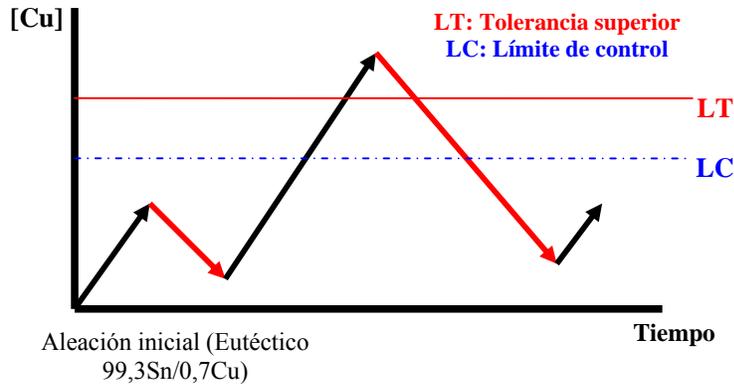
Con este método puede llegar a controlarse la concentración, ya que no hay cantidad límite de aleación a sustituir, es decir, podemos extraer los quilos de aleación que se desee.

#### Desventajas

Se necesita conocer la concentración de cobre en la cuba y hacer un cálculo para determinar la cantidad de aleación a sustituir.

El consumo de aleación es más elevado, hay que tener en cuenta el coste de la aleación contaminada que se extrae para su desecho, el coste del estaño puro, el tiempo que se necesita para homogeneizar la cuba, y el consumo energético que implica por la actuación de las bombas. Los análisis químicos para determinar la concentración de cobre deben ser frecuentes lo que implica unos costes elevados, y además los resultados no son inmediatos. Entre resultado y resultado de los análisis no hay la seguridad de tener controlada la concentración, ya que los paneles fabricados tienen tamaños diferentes, no todos los días se trabaja al mismo ritmo, no todos los paneles tienen la misma cantidad de superficie de cobre a estañar, y también se debe tener en cuenta que hay incertidumbre en variables de proceso como la temperatura de la aleación, que influyen en la cantidad de cobre que se añade de los paneles a la cuba.

La tendencia de la concentración de cobre en la cuba durante la producción en serie, aplicando únicamente este método, se representa gráficamente a continuación.



*Evolución de la concentración de cobre con el tiempo aplicando únicamente este método*

### 6.2.1.3.- Extracción de producto rico en cobre

Consiste en extraer fases ricas en cobre aprovechando las diferencias de densidad.

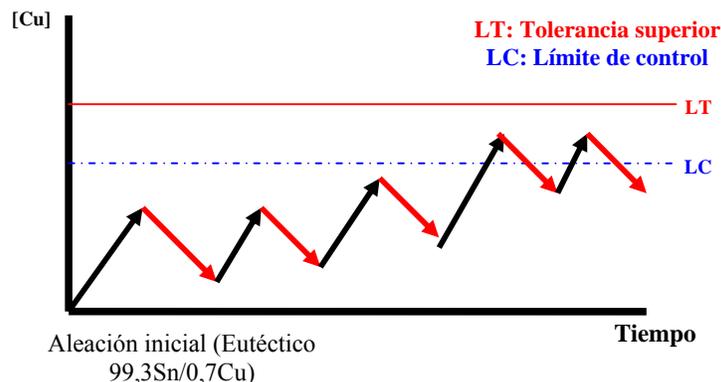
#### Ventajas

Se extrae una pequeña cantidad de aleación que tiene una concentración de cobre superior a la del resto de aleación de la cuba). Puede ser realizado por el propio operario durante la producción, sin que se vea demasiado ralentizada la producción en serie.

#### Desventajas

Con este método por sí sólo, conseguimos reducir el aumento de concentración de cobre, pero no es suficiente para mantener esta concentración dentro del rango deseado a medio plazo.

La tendencia de la concentración de cobre en la cuba durante la producción en serie, aplicando únicamente este método, se representa gráficamente a continuación.



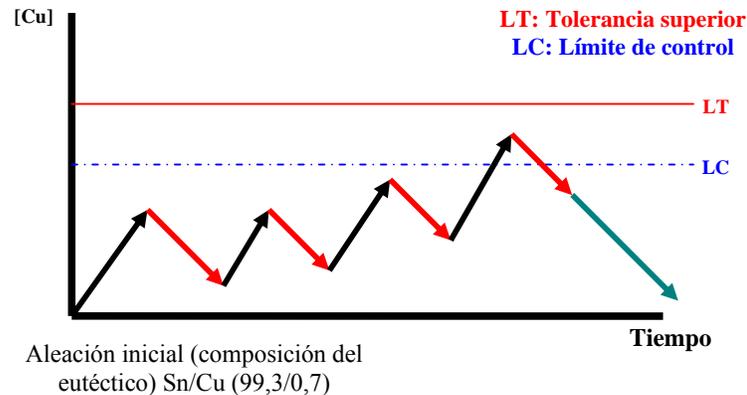
*Evolución de la concentración de cobre con el tiempo aplicando únicamente este método*

### 6.2.1.4.- Combinación de los tres métodos anteriores (Método óptimo)

Relleno (1) + Refresco (2) + Extracción (3) → Método óptimo para control concentración cobre

Combinando los tres métodos conseguimos un eficaz control de la concentración de cobre durante la producción.

La tendencia de la concentración de cobre en la cuba durante la producción en serie aplicando la combinación de estos tres métodos, se representa gráficamente a continuación.



*Evolución de la concentración de cobre con el tiempo combinando los tres métodos*

### 6.2.1.5.- Conclusiones

La identificación de las tres posibilidades para controlar la concentración se ha realizado en base a los conocimientos teóricos, y en la experiencia adquirida por la organización con la utilización de la aleación de (Sn/Pb), no obstante, el siguiente paso consistía en establecer el procedimiento de trabajo correcto para llevarlo a cabo, y comprobar a lo largo del tiempo que las diferentes hipótesis y cálculos eran correctos.

### 6.2.1.6.- Determinación del rango necesario para la concentración de cobre y del espesor

Se trataba de establecer en primer lugar cuál es el valor máximo de concentración de cobre aceptable en la cuba, y definir cómo controlarla.

Por lo que respecta a la estabilidad y control del proceso y de acuerdo a lo explicado en el apartado anterior, el valor máximo lógico es del **1%**.

Por lo que respecta a asegurar que no habrá problemas de calidad y después de analizar varias reclamaciones, hemos llegado a la conclusión que la concentración máxima debería ser de **1,1%**.

Por lo que respecta al espesor que podemos dejar de aleación sobre el cobre, nos interesa que sea la máxima posible, aunque hemos detectado que los problemas de calidad se pueden producir por debajo de **1 micra**.

En resumen, para que se produzca mala mojabilidad y que provoque un problema de calidad en la soldadura e inserción de componentes por el cliente, pueden darse los cuatro casos extremos que se indican a continuación.

- Que la concentración de cobre sea demasiado alta aunque el espesor sea suficiente.
- Que el espesor sea demasiado bajo aunque la concentración de cobre sea ideal (0,7%)
- Que se produzca la combinación más desfavorable, es decir que la concentración sea muy alta y que el espesor sea muy bajo.
- Que la concentración no sea demasiado alta pero el espesor no sea suficiente.

*De acuerdo a lo explicado anteriormente, se ha establecido que el valor mínimo aceptable para el espesor sea de 1 micra, y para el proceso la concentración máxima aceptada de cobre en la cuba será del 1%.*

#### **6.2.1.7.- Fundamento teórico de la influencia del espesor y de la concentración de cobre**

La explicación se encuentra en el diagrama de fases de la aleación binaria (Sn/Cu). Cuando introducimos un panel en la cuba la superficie de cobre del panel entra en contacto con la aleación (99,3Sn/0,7Cu), de manera que se produce una soldadura, generándose también las capas intermetálicas ( $\text{Cu}_3\text{Sn}$ ) y ( $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$ ).

El espesor mínimo de estaño que queda sobre las capas intermetálicas, que a su vez están sobre el cobre del panel, debe ser como mínimo de 0,4 micras para que el proceso de soldadura realizado por el cliente sea correcto. Cuando el proceso (HASL) deja menos de 1 micra de espesor total, es decir, sumando el espesor de las capas intermetálicas y el espesor de la capa de estaño, y/o la aleación tiene una alta concentración de cobre, el efecto de las capas intermetálicas es relativamente grande, ya que no dejan el suficiente espesor (0,4 micras) de aleación de estaño para realizar una buena soldadura con la pasta de estaño o aleación que aplicará el cliente.

Una capa de estaño de 0,4 micras es correcta, pero está al límite y esto implica un riesgo. Si el cliente realiza algún choque térmico al circuito antes de realizar el proceso de soldadura, puede ocurrir que por efecto de la temperatura se reduzca este espesor, agravado cuanto mayor sea la concentración de cobre, produciéndose así los problemas cuando vaya a soldar.

Por todo ello es aconsejable que este espesor sea el mayor posible, y en consecuencia el espesor que deja el proceso (HASL).

Debe tenerse en cuenta que la concentración de cobre en la aleación (Sn/Cu) también influye, siendo la concentración ideal la del eutéctico, de manera que cuanto mayor sea su concentración más desfavorable es la situación. En definitiva, la oxidación del cobre es muy problemática para el proceso de soldadura, por lo que no interesa que la capa para hacer la soldadura esté contaminada de cobre.

#### **6.2.1.8.- Aseguramiento de la calidad. Método de control del cobre, y del espesor**

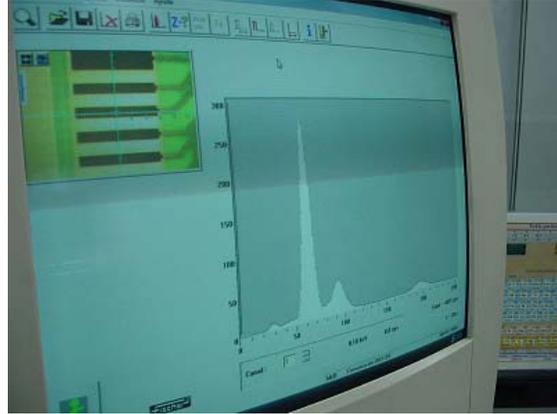
A continuación se hace una explicación de cómo se controlan estas dos variables durante el proceso de fabricación, asegurando así la calidad del producto fabricado.

### 6.2.1.8.1.- Control del espesor

Mediante un equipo de rayos X previamente calibrado, se puede determinar el espesor de la capa de aleación. Se emiten rayos X sobre la muestra y en función de la radiación que recibe el receptor la transforma en un valor de espesor para la muestra analizada.



*Equipo de medición de espesores por rayos X*



*Detalle de la pantalla del programa*

### 6.2.1.8.2.- Control del cobre y cálculo de adiciones (método 2: Refresco de la aleación)

Este apartado es el más importante y sobre el que se ha basado gran parte del proyecto aquí descrito.

No era posible establecer un ritmo de contaminación de cobre en una cuba principalmente por las siguientes razones,

- 1.- No todos los días se trabajan las mismas horas.
- 2.- No es un proceso automático, por lo que la cantidad de paneles estañados varía debido al factor humano.
- 3.- Existen incidencias, averías, y paros por motivos varios.
- 4.- No todos los paneles tienen la misma superficie de cobre.
- 5.- No todos los paneles tienen el mismo tamaño, de manera que la temperatura en la cuba se ve afectada de manera diferente.
- 6.- La temperatura no siempre es la misma y tiene variaciones durante la producción, influyendo en la cantidad de cobre añadido a la cuba.
- 7.- La homogeneización en la cuba no es perfecta.
- 8.- La producción no se realiza en una atmósfera inerte, y la temperatura exterior es diferente.
- 9.- La cantidad de flux que se adhiere a los paneles es diferente.
- 10.- La capacidad de ataque del flux varía en función de su contaminación.

Por todos estos motivos se hacía inviable intentar predecir cuál sería la concentración de cobre y plomo en cualquier momento, por lo que la única manera de saber la concentración era haciendo un análisis químico de una muestra en un laboratorio exterior.

Esta situación obliga a realizar como mínimo un análisis semanal, con los problemas o inconvenientes siguientes,

- 1.- Coste directo e indirecto de realización de los análisis. Para ver detalle de los costes consultar el apartado 9 del presente proyecto, (*Estudio económico general*).
- 2.- Los resultados no son inmediatos, tardan 3 o 4 días desde que se envía la muestra, por lo que en caso de duda durante la producción se trabaja durante ese período sin saber la concentración real, con el riesgo que esto implica.
- 3.- Inestabilidad del proceso, las concentraciones varían y no son conocidas entre los resultados de análisis y análisis.
- 4.- No era viable la compra de un equipo (absorción atómica o por Rayos X (fluorescencia), que permitiese analizar la concentración de los elementos en la muestra, debido a que el coste es demasiado elevado. Ver apartado 9, (*Estudio económico general*).

**En consecuencia, el objetivo se centró en buscar una manera económica y fiable de conseguir controlar la concentración de cobre durante la producción, sin realizar tantos análisis externamente, y sin disponer de un equipo de análisis químico en la organización.**

Para hacerlo sólo se encontró una manera, y pasaba fundamentalmente por conseguir lo siguiente,

- 1.- Cuantificar el efecto sobre la concentración de cobre en la cuba de acuerdo a la producción real que pasaba por una máquina de estañado.
- 2.- Conocer la cantidad en quilos de aleación que se tenía que extraer de la cuba y reemplazar por la misma cantidad de estaño puro, para conseguir pasar de una concentración de cobre a otra deseada. (Método 2 Refresco de la aleación).

En resumen, se trataba de predecir en cualquier momento cuál sería la concentración real de cobre en la cuba, únicamente con el dato de la producción que se ha estañado en la máquina, y en segundo lugar, a partir de esa concentración  $X\%Sn$ ,  $Y\%Cu$ ,  $Z\%Pb$ , saber la cantidad en quilos de estaño puro para conseguir las concentraciones que queramos en la cuba, una vez homogeneizado.

La concentración de plomo es evidentemente muy importante, no por problemas en sí de calidad, sino por la legislación medio ambiental, por lo tanto es prioritario e imprescindible tenerla controlada.

**Este estudio se desarrollo durante cuatro meses y como se verá al final, se consiguió el objetivo con unos resultados y precisión superior a lo esperado.**

Para hacerlo se debían realizar las siguientes etapas,

- 1.- Desarrollar una aplicación informática que permita conocer el área real de cobre estañado durante la producción.
- 2.- Realizar un estudio experimental para determinar cómo evoluciona la concentración en función de la producción real.
- 3.- Realizar un estudio para conocer cómo influye en la concentración de la aleación las adiciones de estaño puro.
- 4.- Conclusiones e integración de los apartados (2) y (3).
- 5.- Desarrollo de una aplicación informática para cálculo de las adiciones de estaño puro necesarias para pasar de una concentración real de la aleación a la concentración deseada, e integración y simplificación para la rutina de producción y puesta en marcha.
- 6.- Validación del estudio.
- 7.- Conclusiones.

### 6.2.1.8.2.1.- (1) Desarrollo de la aplicación informática

Esta aplicación informática debía permitir lo siguiente,

- Calcular el área [ $\text{dm}^2$ ] de cobre libre para cada una de las referencias que lleven proceso (HASL).
- Calcular el área total de cobre libre [ $\text{dm}^2$ ] que ha pasado realmente en una máquina, a partir de la imputación por parte de los operarios de la producción que han realizado en un turno. (Realmente se trata de multiplicar el área de cobre a estañar de un panel, por el número de paneles en el turno).
- Los operarios deberán introducir informáticamente los datos referentes a la producción, (nº operario, hora inicio, referencia fabricada, cantidad de paneles que han estañado, hora final, nº de lote). De esta manera el programa podrá calcular a partir de los datos introducidos por el operario la cantidad de cobre real [ $\text{dm}^2$ ] que ha pasado por la cuba en ese periodo (hora final – hora inicio).

### 6.2.1.8.2.2.- (2) Evolución de la concentración del cobre en producciones reales

Una vez implantada la aplicación informática, y formado al personal, el siguiente paso era realizar un estudio experimental mediante producciones en serie para determinar cómo evoluciona la concentración de cobre, plomo y estaño, en función de la producción real, para lo cual era necesario realizar análisis frecuentes de la cuba para obtener los datos siguientes,

- Concentración de los siguientes elementos de la aleación (%Sn, %Cu, %Pb) al inicio del turno.
- Concentración de los siguientes elementos de la aleación (%Sn, %Cu, %Pb) al final del turno.
- [ $\text{dm}^2$ ] de cobre libre que se han estañado entre estos dos análisis.

El objetivo es evidente, se trata de conocer cómo evoluciona la concentración de estos elementos en función del área de cobre real que se ha estañado entre muestra y muestra. Esto había que realizarlo teniendo en cuenta que existían variables que añadían incertidumbre y que no se podían controlar, y también teniendo en cuenta estas determinaciones debían ser representativas, no debían partir siempre de una composición eutéctica, sino que debía contemplar un rango de concentraciones más amplio, ya que sabemos que el incremento de la concentración de cobre no es la misma a concentraciones bajas que altas, como se ha comentado anteriormente.

Inicialmente se partía prácticamente de cero, no sabíamos cómo iba a evolucionar, por lo que era necesario realizar una gran cantidad de análisis. No obstante nos encontrábamos con la problemática siguiente,

- 1) La producción en serie debía verse afectada lo mínimo posible, ya que los paros de máquina suponían un coste improductivo importante, además del riesgo de incumplir plazos de entrega al cliente.
- 2) El coste de los análisis.
- 3) Al tratarse de producción en serie que se entrega al cliente, debíamos extremar la precaución, ya que podíamos incidir sobre la calidad del producto y provocar una reclamación por parte del cliente, con costes muy elevados.
- 4) En el momento inicial era conocido que sustituir cantidades de aleación y reemplazarlas por estaño puro, reducía la concentración de cobre y plomo, aunque no se sabía qué cantidades eran necesarias, haciéndose adiciones únicamente cuando se detectaba que las temperaturas eran demasiado altas. Se debía procurar que la muestra inicial y final fueran recogidas en un intervalo en el cuál el operario no hubiese añadido estaño. No obstante, en ocasiones y sin que se pudiese prever, era posible que en la producción realizada entre la toma de las dos muestras, el operario hubiese tenido que reemplazar algo de aleación de la cuba por estaño

puro. Estas adiciones solían ser de cantidades importantes, debido a que la temperatura necesaria para mantener la aleación era demasiado alta. Además, como durante la producción se produce una pérdida de aleación, se podía dar el caso que fuese necesario completar el nivel de la cuba añadiendo algunos lingotes de estaño puro. No obstante, se había dado instrucciones al personal que procurase dentro de lo posible, no añadir nada entre muestra y muestra, y en caso que tuviesen que hacerlo que registrasen la cantidad de estaño que habían añadido, (rellenar el nivel de la cuba), o la cantidad de aleación que habían reemplazado por estaño puro).

- 5) Había otra variable a tener en cuenta. La temperatura en las cubas es controlada por sondas que tienen una incertidumbre alta debido a la escoria que se genera en el proceso. Se llegó a detectar que la temperatura que indicaba la sonda podía ser incluso 15°C por debajo de la real. No obstante, no era viable prever cada cuánto tiempo la sonda debía ser limpiada, ya que era algo inestable; podía dar valores fiables hasta varios días después de ser limpiada, o también podía darse el caso que al día siguiente ya no fuese fiable. Esto obligaba a realizar mediciones con termómetros manuales, pero hay que tener en cuenta que no se podía ralentizar en exceso el proceso, ya que podíamos provocar un cuello de botella en el proceso de producción.

*El objetivo de esta fase es llegar a determinar el % de concentración de cobre, y plomo que aumenta por cada [dm<sup>2</sup>] de superficie de cobre que estañamos. Además se debía estudiar si esto era válido para todo el rango de concentraciones, o si por el contrario no era lineal en función de las concentraciones.*

#### **6.2.1.8.2.3.- (3) Influencia en la concentración de cobre de la aleación vs adiciones de estaño**

El objetivo era realizar un estudio con el que determinar como influía en la concentración de cobre y plomo en la aleación, las adiciones de estaño puro. Paralelamente al paso (2) explicado en el apartado 6.2.1.8.2.2, se realizó esta fase que consistía en que los operarios recogiesen una muestra inmediatamente antes de hacer una adición de estaño puro, y otra después de unas dos horas de homogeneización tras la adición, en las cuáles no se realizaba producción. Con esto intentábamos determinar cómo se veía modificada la concentración de los elementos con adiciones conocidas de estaño puro.

- 1) Era completamente necesario que después de la adición la recirculación de la aleación fuese suficiente, para conseguir la máxima homogeneización. A mayor cantidad de estaño puro adicionado los tiempos para homogeneización aumentaban. Se estableció que durante la realización del estudio este tiempo no fuese inferior a las dos horas, lo que suponía una problemática para la planificación de la producción.

*El objetivo de esta fase es llegar a determinar cuántos quilos de estaño puro hay que añadir para pasar de un valor de concentración de cobre, estaño y plomo, a otros que deseamos. Además se debía estudiar si esto era válido para todo el rango de concentraciones, o si por el contrario no era lineal.*

#### **6.2.1.8.2.4.- (4) Conclusiones e integración de los apartados (2) y (3)**

En esta fase se trataba de integrar los conocimientos adquiridos en los apartados (2) y (3). Todo este estudio fue lógicamente muy complejo, y requirió varios meses para llevarse a cabo. Se recopiló una gran cantidad de datos que fueron analizados detalladamente.

Una de las conclusiones más importantes fue que tanto para el apartado (2) como para el (3), la evolución era lineal en los rangos de concentración que queríamos controlar, por ejemplo de 0,7% de cobre a 1% de cobre, e inferior a 0,1% para el plomo.

Otro de los problemas era la incertidumbre de otras variables.

En resumen, nos enfrentábamos a un estudio particularmente complejo ya que queríamos conocer según el apartado (2), cuál era la concentración que hay en la cuba en base a la producción real, pero sin realización de análisis químicos, y en segundo lugar, de acuerdo a esa concentración que asumimos como real hacer adiciones para conseguir la concentración deseada según unos cálculos que también asumimos como correctos. Si alguno de estos dos cálculos no es del todo preciso, y si sumamos el efecto de otras variables, la consecuencia es que el proceso estará ligeramente descontrolado, con lo que al cabo del tiempo volveríamos a tener problemas.

Los datos utilizados para este estudio incluyen información de la producción, turnos de la empresa, cantidades, etcétera, y por este motivo no se presentan en este informe. A partir de esos datos se intentaba definir cuál sería el valor para el apartado (3) y para el apartado (4), que lógicamente en un primer momento eran aproximados, y que según avanzaba el estudio, eran cada vez más precisos.

Finalmente se determinó la cantidad de estaño puro que se tenía que adicionar por cada [dm<sup>2</sup>] de área de cobre estañado. El valor X kg/dm<sup>2</sup>, no se indica en el presente proyecto.

#### **6.2.1.8.2.5.- (5) Aplicación informática para cálculo adiciones de estaño**

Una vez conocido cómo evolucionan las concentraciones de los elementos en función de la producción, y de cómo influyen las adiciones de estaño puro en las concentraciones, era necesario desarrollar una aplicación informática en la cuál introduciendo la concentración inicial (la real de la cuba) y la final (la deseada en la cuba), nos dijese la cantidad de aleación a refrescar, es decir, los quilos de aleación contaminada a sustituir por la misma cantidad de estaño puro. Una vez hecho esto, era necesario que el operario introdujese en el programa de producción los quilos de estaño que ha adicionado, para que automáticamente le saliese una alerta que le vaya diciendo lo que añadir por día, siendo una manera sencilla y segura de llevarlo a cabo.

Una vez realizado el estudio se creó una aplicación en Excel basada en cálculos estequiométricos y en algún factor de corrección determinado experimentalmente. Sólo hay cuatro campos en los que el usuario puede introducir datos, que son los siguientes,

Celda B4: Se introduce el % de estaño que hay en la cuba según el análisis.

Celda B5: Se introduce el % de plomo que hay en la cuba según el análisis.

Celda B6: Se introduce el % de cobre que hay en la cuba según el análisis.

Celda B3: Se introduce una cantidad de quilos de aleación a sustituir por la misma cantidad de estaño puro, viendo en las celdas C6, D6, y E6, cuáles son los valores de concentración a los que quedará cada uno de los elementos si se hace esta adición.

Por ejemplo, introducimos en los campos de color amarillo los datos de concentración para el estaño, plomo y cobre, que en este caso son respectivamente, 98,59 %, 0,04 %, y 1,25 % Cu.

Podemos ver que en la celda D6 nos indica automáticamente en color verde que la concentración de plomo es correcta, pero en la celda E6 sale coloreada en color rojo, indicándonos que la concentración de cobre está por encima del valor que hemos fijado como máximo.

Lógicamente estos valores son los mismos que los iniciales, ya que no hemos introducido ningún valor para la adición en la celda B3.

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	<b>PROGRAMA CÁLCULO kg EN EL HASL (ESTAÑO LEAD FREE)</b>		<b>Sn</b>	<b>Pb</b>	<b>Cu</b>	<b>resto de elementos en la composición</b>	<b>Cantidad total de aleación en la cuba (Si no suma 500 es que hay algún error)</b>	
2	<b>Datos a introducir para el cálculo</b>		492,965	0,200	6,250	0,585	500,00	
3	Indicar los kg que se pretende sacar de la cuba							
4	Indicar el % de Sn existente en la cuba según el resultado del análisis	98,593	<b>Sn</b>	<b>Pb</b>	<b>Cu</b>	<b>resto de elementos en la composición</b>		
5	Indicar el % de Pb existente en la cuba según el resultado del análisis	0,040						
6	Indicar el % de Cu existente en la cuba según el resultado del análisis	1,250	98,593	0,040	1,250	0,117		
7	Resto	0,117	<b>% de cada uno de los elementos en la cuba después de retirar una cantidad de baño, y adición de la misma cantidad de Sn puro</b>					
8	Valor máximo permitido en % de Cu en la cuba = 1 %. El valor mínimo es de 0,7%.							
9	Valor máximo permitido en % de Pb en la cuba = 0,1 %							
10								
11								
12	Datos a introducir por el usuario.							
13								
14	OK, con la cantidad de Sn puro añadido conseguimos una concentración de cobre entre 0,7% y 1 %, y de plomo inferior al 0,1%.							
15	NOK, con la cantidad de Sn puro añadido no conseguimos una concentración de cobre dentro de la tolerancia fijada (0,7% - 1%), y de plomo inferior a 0,1%, por lo que hay que añadir más cantidad de estaño puro.							
16								
17								
18								
19								
20								
21								
22								

Ejemplo de cálculo: (concentraciones iniciales, concentraciones finales, cantidad de estaño puro a adicionar)

Si introducimos en la celda B3 por ejemplo 50 kg, vemos que la concentración de plomo sería aproximadamente de 0,036%, pero que para el cobre sería de 1,125%, por lo que la cantidad de aleación reemplazada por esta misma cantidad de estaño puro no es suficiente para conseguir todas las concentraciones dentro del rango deseado.

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	PROGRAMA CÁLCULO kg EN EL HASL (ESTAÑO LEAD FREE)		Sn	Pb	Cu	resto de elementos en la composición	Cantidad total de aleación en la cuba (Si no suma 500 es que hay algún error)	
2	Datos a introducir para el cálculo		493,669	0,180	5,625	0,526	500,00	
3	Indicar los kg que se pretende sacar de la cuba							
4	Indicar el % de Sn existente en la cuba según el resultado del análisis		98,593	Sn	Pb	Cu	resto de elementos en la composición	
5	Indicar el % de Pb existente en la cuba según el resultado del análisis		0,040					
6	Indicar el % de Cu existente en la cuba según el resultado del análisis		1,250	98,734	0,036	1,125	0,105	
7	Resto		0,117	% de cada uno de los elementos en la cuba después de retirar una cantidad de baño, y adición de la misma cantidad de Sn puro				
8	Valor máximo permitido en % de Cu en la cuba = 1 %. El valor mínimo es de 0,7%.							
9	Valor máximo permitido en % de Pb en la cuba = 0,1 %							
10								
11								
12	Datos a introducir por el usuario.							
13								
14	OK, con la cantidad de Sn puro añadido conseguimos una concentración de cobre entre 0,7% y 1 %, y de plomo inferior al 0,1%.							
15								
16	NOK, con la cantidad de Sn puro añadido no conseguimos una concentración de cobre dentro de la tolerancia fijada (0,7% - 1%), y de plomo inferior a 0,1%, por lo que hay que añadir más cantidad de estaño puro.							
17								
18								
19								
20								
21								
22								

Ejemplo de cálculo: (concentraciones iniciales, concentraciones finales, cantidad de estaño puro a adicionar)

Se trata de ir aumentando este valor hasta que la celda E6, en este caso, salga de color verde. En este caso, lo conseguimos con una cantidad de 100 quilos. Por ejemplo, como se muestra en la pantalla siguiente, con 99 quilos no se consigue, aunque por poco ya que el valor es 1,003%.

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	PROGRAMA CÁLCULO kg EN EL HASL (ESTAÑO LEAD FREE)		Sn	Pb	Cu	resto de elementos en la composición	Cantidad total de aleación en la cuba (Si no suma 500 es que hay algún error)	
2	Datos a introducir para el cálculo		494,358	0,160	5,013	0,469	500,00	
3	Indicar los kg que se pretende sacar de la cuba		99,000					
4	Indicar el % de Sn existente en la cuba según el resultado del análisis		98,593	Sn	Pb	Cu	resto de elementos en la composición	
5	Indicar el % de Pb existente en la cuba según el resultado del análisis		0,040					
6	Indicar el % de Cu existente en la cuba según el resultado del análisis		1,250	98,872	0,032	1,003	0,094	
7	Resto		0,117	% de cada uno de los elementos en la cuba después de retirar una cantidad de baño, y adición de la misma cantidad de Sn puro				
8	Valor máximo permitido en % de Cu en la cuba = 1 %. El valor mínimo es de 0,7%.							
9	Valor máximo permitido en % de Pb en la cuba = 0,1 %							
10								
11								
12	Datos a introducir por el usuario.							
13								
14	OK, con la cantidad de Sn puro añadido conseguimos una concentración de cobre entre 0,7% y 1 %, y de plomo inferior al 0,1%.							
15								
16	NOK, con la cantidad de Sn puro añadido no conseguimos una concentración de cobre dentro de la tolerancia fijada (0,7% - 1%), y de plomo inferior a 0,1%, por lo que hay que añadir más cantidad de estaño puro.							
17								
18								
19								
20								
21								
22								

Ejemplo de cálculo: (concentraciones iniciales, concentraciones finales, cantidad de estaño puro a adicionar)

En la pantalla siguiente se observa como con 100 quilos sí conseguimos un valor OK.

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	<b>PROGRAMA CÁLCULO kg EN EL HASL (ESTAÑO LEAD FREE)</b>		<b>Sn</b>	<b>Pb</b>	<b>Cu</b>	<b>resto de elementos en la composición</b>	<b>Cantidad total de aleación en la cuba (Si no suma 500 es que hay algún error)</b>	
2	<b>Datos a introducir para el cálculo</b>		494,372	0,160	5,000	0,468	500,00	
3	Indicar los kg que se pretende sacar de la cuba	100,000						
4	Indicar el % de Sn existente en la cuba según el resultado del análisis	98,593	<b>Sn</b>	<b>Pb</b>	<b>Cu</b>	<b>resto de elementos en la composición</b>		
5	Indicar el % de Pb existente en la cuba según el resultado del análisis	0,040						
6	Indicar el % de Cu existente en la cuba según el resultado del análisis	1,250	98,874	0,032	1,000	0,094		
7	Resto	0,117	<b>% de cada uno de los elementos en la cuba después de retirar una cantidad de baño, y adición de la misma cantidad de Sn puro</b>					
8	Valor máximo permitido en % de Cu en la cuba = 1 %. El valor mínimo es de 0,7%.							
9	Valor máximo permitido en % de Pb en la cuba = 0,1 %							
10								
11								
12	<b>Datos a introducir por el usuario.</b>							
13								
14	OK, con la cantidad de Sn puro añadido conseguimos una concentración de cobre entre 0,7% y 1 %, y de plomo inferior al 0,1%.							
15								
16	NOK, con la cantidad de Sn puro añadido no conseguimos una concentración de cobre dentro de la tolerancia fijada (0,7% - 1%), y de plomo inferior a 0,1%, por lo que hay que añadir más cantidad de estaño puro.							
17								
18								
19								
20								
21								
22								

Ejemplo de cálculo: (concentraciones iniciales, concentraciones finales, cantidad de estaño puro a adicionar)

Debe tenerse presente que se trata de un proceso industrial y por lo tanto había que buscar la manera de hacerlo práctico. Se implementó informáticamente y se integraron estos cálculos en el programa de producción, de manera que el operario pudiese en cualquier momento, hacer la consulta del “déficit de estaño puro” que había en la cuba. Es decir, en función de los datos de producción introducidos por los operarios y fundamentalmente basándose en los datos de cantidad de paneles estañados y de las adiciones realizadas por los operarios, el programa informático calcula qué cantidad de aleación debería ser reemplazada por estaño puro. Este cálculo es continuo, se hace basándose en el histórico de paneles y adiciones realizados.

Por ejemplo, supongamos que este proceso sólo trabaja un turno de 6:00 a 14:00 de lunes a viernes. El operario empieza la producción el lunes a las 6:00, y cuando acaba hace la consulta y el programa le indica que para tener las concentraciones en los valores deseados, sería necesario retirar 20 quilos de aleación y añadir 20 quilos de estaño puro, pero el operario no lo hace; al día siguiente (martes) realiza la producción normal, y al acabar a las 14:00 y volver a hacer la consulta el programa calcula que la cantidad necesaria para compensar la producción de ese martes es de 6 quilos, de manera que el programa indicará el déficit total, es decir 26 quilos. Si el operario reemplaza por ejemplo 30 quilos y hace la consulta justo después de esta adición, el programa indicará que hay un exceso de 4 quilos, etcétera.

El operario del turno de la mañana al iniciar la jornada hace la consulta para saber cuál es déficit existente, añade esa cantidad, y mantiene la recirculación de las bombas durante dos horas homogeneizando la aleación.

No obstante, nos encontrábamos con los siguientes problemas,

1.- El programa se basa en los datos introducidos por el operario, (no tiene un sistema de control ni realiza análisis de la cuba), de manera que si no son correctos o se olvida de introducirlos, los resultados que da el programa no son válidos.

2.- Debido a que para homogeneizar una cuba después de una adición se necesitan unas dos horas, no era viable adicionar durante la producción, sólo al inicio o al final.

Para solucionar el primer problema, se impartió formación al personal, además de hacerse una supervisión diaria por el responsable de la sección durante un mes.

Se realizó un estudio en el que se comprobó que incluso con la máxima producción posible y en las condiciones más desfavorables, el aumento de concentración de los elementos no podía salirse de la tolerancia por la producción de un solo día.

#### **6.2.1.8.2.6.- (6) Validación del estudio**

Una vez implementadas las aplicaciones informáticas, y formado al personal, sólo quedaba ponerlas en marcha para validarlas, y comprobar que efectivamente las concentraciones estarían controladas.

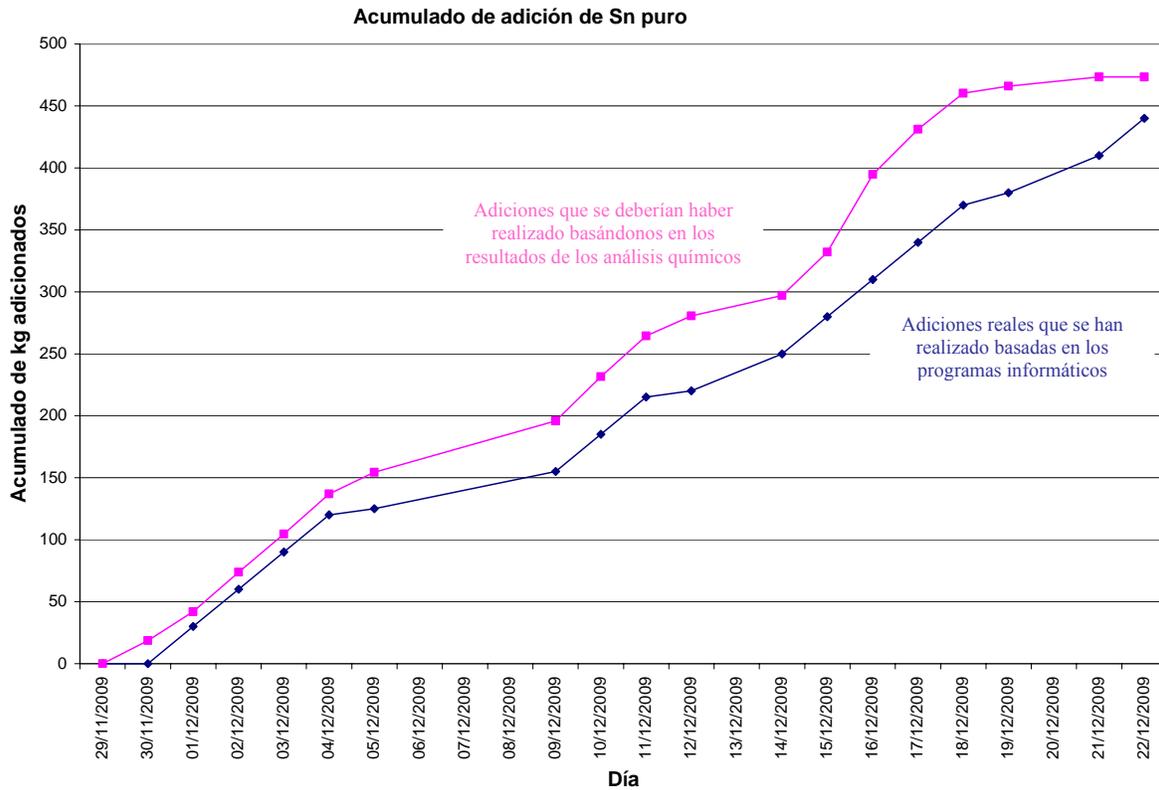
Cómo se verá en los gráficos siguientes, los resultados han sido excelentes, consiguiéndose controlar de manera óptima la concentración del cobre y del plomo en la aleación.

La validación inicial y puesta en marcha fue realizada a finales de noviembre y durante todo el mes de diciembre del año 2009. Para facilitar el estudio se sustituyó antes de comenzar toda la aleación de la cuba por lingotes de (Sn/Cu) de composición eutéctica. Durante ese periodo se realizaron las adiciones únicamente basándonos en los programas, pero por seguridad y para garantizar que no había algún error grave, se realizaron también los análisis químicos. Es decir, las adiciones se hacían en base al programa y no en base a los resultados obtenidos en los análisis, que sólo eran informativos y sólo se hubiesen tenido en cuenta en caso de detectar alguna diferencia muy importante.

En el gráfico siguiente se presenta la comparación entre las adiciones reales que se hicieron durante el mes de diciembre basadas únicamente en los programas y en los cálculos teóricos, y las adiciones que deberían haberse realizado según los resultados reales de los análisis que se hicieron a las muestras.

Debe tenerse en cuenta que para el primer caso hay una doble incertidumbre, ya que lógicamente no conocíamos la exactitud del programa para predecir las concentraciones, ni la del programa para determinar la adición en base a esa concentración. En caso de haber utilizado los resultados de los análisis, evidentemente suprimiríamos la incertidumbre del primer programa, aunque quedaría la incertidumbre del programa que calcula las adiciones a partir de las concentraciones.

Se puede observar como durante todo el mes de diciembre se han adicionado cantidades ligeramente inferiores a lo que se habría adicionado si nos hubiésemos guiado por los resultados de los análisis químicos, detectándose en general una tendencia a aumentar la diferencia según pasan los días, lo que nos permitió detectar que había un ligero error en el programa que se iba arrastrando según pasaba el tiempo. La solución pasó por introducir un factor de corrección.



*Gráfico con el acumulado de Sn puro adicionado durante el mes de diciembre*

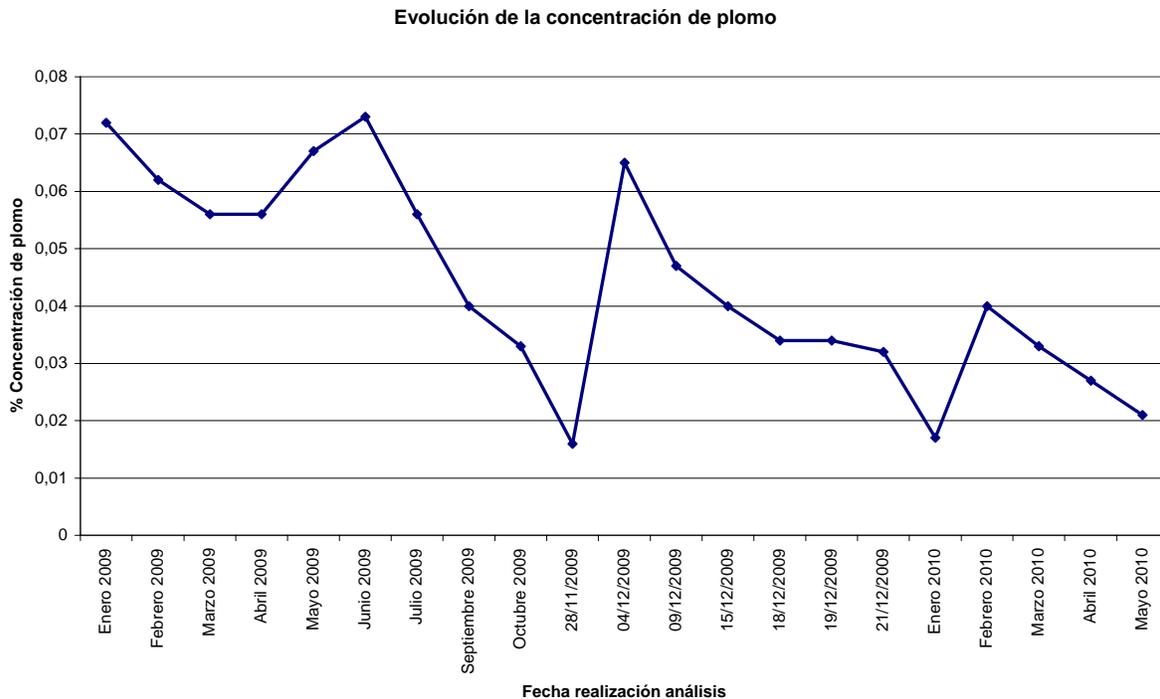
En enero del año 2010 se hizo una revisión de los programas informáticos introduciendo los ajustes y factores de corrección necesarios, y que fueron implementados de manera inmediata.

Entre los meses de enero y mayo del 2010, y una vez comprobado en enero que los programas son fiables, simplemente se ha realizado un análisis químico mensual para comprobar si el proceso está controlado.

En los dos gráficos siguientes se presenta la evolución de la concentración de plomo y cobre respectivamente entre enero del 2009 y mayo del 2010 según los análisis químicos que se han ido realizando. De acuerdo con la tendencia del gráfico, se identifican tres etapas, antes de implementar los programas y aplicarlo industrialmente, el mes de diciembre donde se puso en marcha y se hicieron los ajustes necesarios (validación inicial), y la tercera etapa que comienza a partir de enero del 2010 donde se evidencia con el paso del tiempo que el proceso está controlado, y las concentraciones dentro de tolerancia (validación final).

Por lo que respecta a la concentración de plomo, se observa que hasta noviembre del 2009 ha sido siempre inferior al 0,1% pero estando muy próxima a este valor límite. Durante el mes de diciembre en general se aprecia que los valores de concentración de plomo son inferiores en comparación con los valores que se estaban obteniendo hasta entonces.

Finalmente, desde enero hasta mayo se observa unos valores aún más bajos, y con una tendencia a reducirse aún más y a estabilizarse a valores próximos al 0,03%.

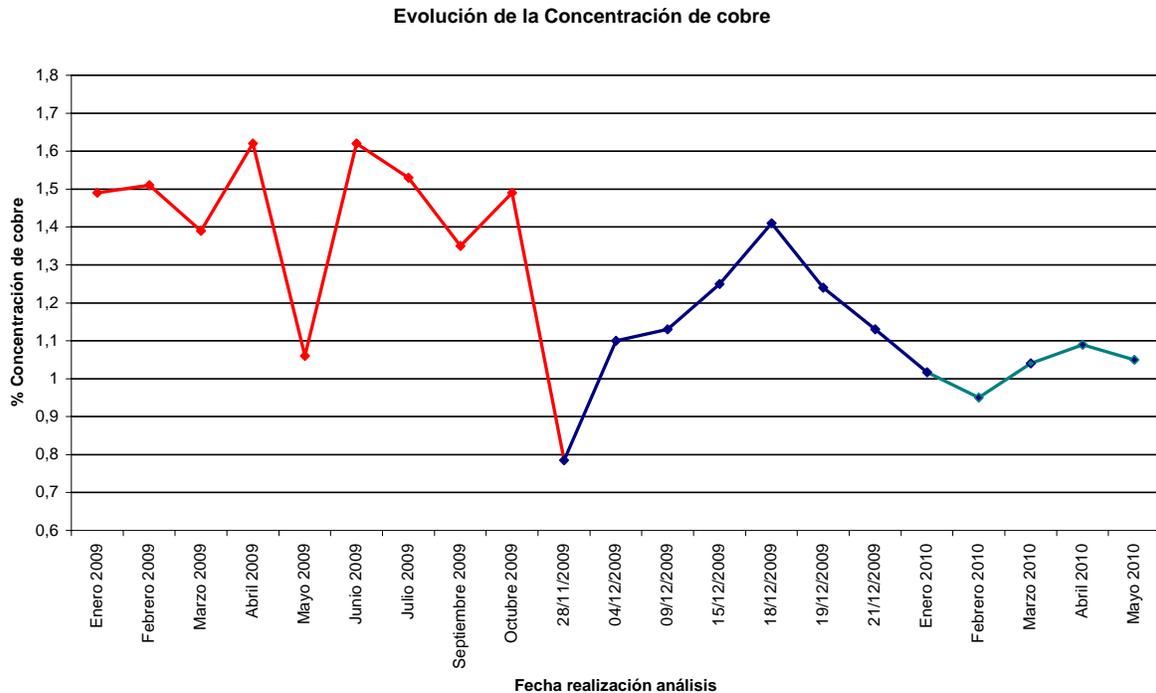


*Gráfico evolución de la concentración del plomo*

En el gráfico que se presenta a continuación se muestra la evolución de la concentración del cobre, en el cual se observa una gran irregularidad en los resultados de los análisis, estando muy por encima del valor máximo ideal. Sólo en el mes de mayo está por debajo del 1,1% y ha sido debido a que se adicionó una cantidad muy elevada de estaño puro, aproximadamente el 50%.

Durante el mes de diciembre se aprecia como se ha reducido este valor de concentración excepto en la muestra del día 18 de diciembre. Esto es perfectamente coherente con la gráfica que compara las adiciones reales que hemos realizado, con las que hubiésemos realizado a partir de los resultados de los análisis, ya que es precisamente en esa fecha donde está la mayor diferencia.

Finalmente, una vez realizadas las modificaciones e introducidos los factores de corrección necesarios, se evidencia que los meses siguientes, entre enero y mayo los resultados de la concentración de cobre están por debajo del 1,1%.



#### 6.2.1.8.2.7.- (7) Conclusiones

La conclusión es que el estudio desarrollado en el apartado 6.2.1.8.2 y sus correspondientes sub apartados ha sido un éxito. El control de la concentración de los elementos en la cuba al cabo de varios meses después de ponerlo en marcha evidencia que está garantizado, siempre y cuando se respeten los procedimientos establecidos. No obstante, y por seguridad se realizará un análisis bimensual.

En consecuencia la concentración de plomo está muy por debajo del 0,1%, y la concentración de cobre está entre 1,0 y 1,1%. A pesar que en el apartado 6.2.1.6 del presente proyecto se había indicado que el valor máximo aceptado para la concentración de cobre en la aleación de la cuba era de 1,0%, los problemas de calidad se producen a partir del 1,1%, siendo este valor el que realmente importa.

Si tenemos en cuenta las incertidumbres existentes en el proyecto, y por todo lo comentado anteriormente, consideramos que hemos alcanzado este objetivo, y hemos obtenido un control y estabilidad mayor de lo esperado.

## **7.- Estudio de otras variables que influyen en el proyecto**

Paralelamente a la investigación explicada en el apartado 6 se estudiaron otras variables que también intervienen en el proceso, y que debían ser controladas.

Algunos de los objetivos fijados en el apartado 3 del presente proyecto quedan implícitamente solucionados mediante la aplicación de lo explicado a continuación, como por ejemplo el objetivo de minimizar la merma interna, reducir los costes de no calidad, y por otra parte estabilizar y controlar el proceso, minimizar paros, averías, y en definitiva tiempos improductivos.

### **7.1.- Mantenimiento preventivo de las máquinas**

Para optimizar el proceso de estañado es completamente necesario realizar un buen mantenimiento preventivo. Se realizó un estudio con un equipo multidisciplinar para establecer y documentar el procedimiento que debe seguirse para mantener las máquinas en condiciones óptimas.

Entre los aspectos a controlar destacan los siguientes,

#### **7.1.1.- Limpieza de cuchillas y de las guías**

Cuando el panel sale de la cuba y asciende hasta la posición inicial, hay unas cuchillas que a través de unas boquillas muy próximas al panel soplan aire caliente a presión, y con unas orientaciones determinadas. Por efecto de la presión hacen que el espesor de la aleación sea más o menos homogéneo sobre el panel. Lógicamente se trata de un elemento importante en el proceso.

El procedimiento de limpieza consiste en sacar periódicamente la cuchilla y las guías de la máquina, limpiar con una espátula el estaño depositado en la superficie y un soplete para eliminar el resto que no se pueda eliminar con la espátula. A continuación, y sólo para el caso de las cuchillas, se pasa unas galgas para comprobar que las boquillas por las que sale el aire no están obstruidas, y finalmente se introduce agua para comprobar que no hay fugas.

#### **7.1.2.- Cabina de trabajo**

También es necesario realizar la eliminación de restos de aleación que queden en elementos de la cabina principal, como las pinzas, las paredes, o la salida de extracción de humos.

#### **7.1.3.- Parte superior de la cámara (sonda de temperatura)**

Es necesario limpiar las paredes y la sonda periódicamente rascando con una espátula para eliminar los residuos del flux quemado. Esto es especialmente importante para la sonda de temperatura, ya que si no está limpia y no se eliminan los residuos, el valor de temperatura que nos indica tiene una incertidumbre de +/- 10°C, cuando si está limpia es de +/- 3°C.

#### **7.1.4.- Parte inferior de la cámara (zona turbina y bomba)**

También es muy importante realizar una limpieza periódica de la bomba. Una vez las bombas hayan sido limpiadas, y mientras no se monten en la máquina, deberán estar sumergidas en sosa al 30%.

## **7.2.- Desalojo de aceite (procedimiento de trabajo para evitar riesgo de incendio)**

Cuando se finaliza un turno de trabajo y no se va a producir hasta el día siguiente, es necesario parar las bombas de recirculación para que la aleación llegue a su nivel máximo, y antes de enfriar, extraer el aceite (restos de flux) que quedarán en la superficie, a través de un tubo de desagüe que está a la altura de la aleación. Esto debe hacerse diariamente para evitar riesgo de incendio al día siguiente, a la hora de calentar la aleación.

## **7.3.- Elección de un flux adecuado**

El producto utilizado para activar la superficie del cobre (flux) es un elemento importante y crítico, ya que la elevada temperatura a la que se trabaja con la aleación libre de plomo puede producir problemas de calidad relacionados con el flux. Los fluxes utilizados para la aleación libre de plomo son más agresivos y generan más escoria que los utilizados para la aleación estaño plomo.

La escoria es el resultado de la carbonización de los componentes orgánicos del flux debido a la alta temperatura. Se ha detectado que a partir de 270°C la generación de escoria aumenta exponencialmente.

Se realizó un estudio para encontrar el flux de composición idónea, buscando el equilibrio entre una adecuada activación del cobre y la mínima generación de escoria, teniendo en cuenta las temperaturas a las que se mantiene la aleación.

## **7.4.- Control de proceso por los operarios: Definición de los parámetros de proceso (HASL)**

Se revisaron y establecieron los parámetros de trabajo óptimos además de sus tolerancias, para las diferentes variables de proceso que intervienen, así como los controles a realizar por los operarios. Entre estas variables de proceso y por lo que respecta únicamente al estañado en la cuba, las más importantes son la temperatura del aire de soplado, la temperatura de aleación en la cuba, tiempo de inmersión, tiempo de soplado, presión de las cuchillas, velocidad de subida y bajada, frecuencia de la bomba. Los valores y tolerancias son información privada de la empresa. No obstante, la variable que nos interesa principalmente para el desarrollo del proyecto final de carrera es la temperatura de aleación, que la mantenemos en 280 +/- 5°C.

El proceso completo y como se ha comentado anteriormente, se compone de una fase de carga de paneles en línea automática, activación de la superficie (micro ataque), lavado con agua de red y desionizada, secado, fluxado, estañado (que es la fase principal estudiada en este proyecto), lavado con agua de red y agua desionizada, secado, y descarga de paneles. Para cada una de las fases, también hay variables de proceso que son controladas, como temperaturas, estado rodillos, kanebos (tipo de rodillo especial), presiones, entre otras, pero igualmente no se dan estos valores por ser información confidencial de la organización.

## **7.5.- Control de calidad por los operarios: Autocontrol**

Una vez adquirido un mayor conocimiento sobre este proceso se han revisado los controles de calidad que deben realizar los operarios y por el laboratorio interno de la empresa.

## **8.- Impacto medio ambiental y efecto sobre la salud humana**

Existe multitud de legislación que regula o prohíbe el uso de este elemento, y de los diferentes compuestos que puede formar. La causa es evidentemente su gran toxicidad, con efectos indeseables tanto sobre el ser humano, como sobre el medioambiente, afectando a los diversos ecosistemas. A continuación se hace una breve explicación del impacto ambiental del este elemento sobre el medio ambiente, y del efecto de su toxicidad sobre el ser humano, animales y plantas.

### **8.1.- Efecto del plomo sobre la salud humana**

El plomo es un metal pesado que tiene efectos nocivos sobre el ser humano cuando entra en el organismo. La intoxicación puede ser aguda, o manifestarse sus efectos al cabo de años de exposición si la cantidad de plomo eliminada por el cuerpo es inferior a la que entra, (bioacumulable). El tiempo de eliminación del plomo por el cuerpo humano es diferente en función de dónde se haya concentrado, por ejemplo, el tiempo de permanencia cuando está en huesos es muy superior (años) que cuando está en sangre (días).

El plomo se acumula en el sistema nervioso central y es particularmente perjudicial en el desarrollo mental de los niños. Las vías de entrada en el organismo son por inhalación de polvo de plomo o por ingestión, como por ejemplo por llevarse las manos a la boca después de haber tocado objetos cubiertos de polvo que contiene plomo, por ingesta directa de alimentos que contengan plomo, o bebiendo agua contaminada. Debe tenerse en cuenta que la intoxicación puede producirse no sólo por plomo puro, sino también por sus compuestos, lo que varía notablemente las posibilidades. Por lo que respecta a su efecto carcinogénico, no ha sido demostrado.

Los síntomas de una intoxicación de plomo pueden ser, anemia, fatiga, dolor de cabeza, insomnio, hipotensión, pérdida de peso, malestar gastrointestinal, daño al sistema nervioso, al cerebro, daño a los riñones, daños al feto, palidez, desnutrición, formación de depósitos plúmbicos en las encías, perturbaciones en el comportamiento, saturnismo, aumento de la agresividad y del comportamiento impulsivo, o influencia sobre la conducta, entre otros.

La intoxicación con plomo tiene efectos mucho más dañinos sobre los niños que en los adultos, y sus efectos son los mismos tanto si el plomo ha sido ingerido como inhalado.

Existe una gran cantidad de legislación, reglamentos, y recomendaciones que hacen referencia al plomo, donde se establecen los (ppm) máximos de este elemento en los alimentos, agua potable, materiales, aplicaciones, niveles máximos en sangre, etcétera.

Por ejemplo, según la (EPA) la cantidad de plomo en el agua potable debe ser de como máximo 15 µg por litro.

La (OMS) establece como valor límite 100 mg Pb/100 ml de sangre, aunque en la mayoría de países este valor es inferior. También fija que la ISTP (Ingesta Semanal Tolerable Provisional) del plomo es de 25 µg/kg peso.

Se estima que la concentración máxima de plomo en sangre con la que todavía no se ve afectada la salud es de 35 µg Pb/100 ml de sangre para los adultos, y de 30 µg Pb/100 ml para niños y mujeres embarazadas.

## **8.2.- Impacto medio ambiental**

El plomo y sus compuestos ha sido un elemento muy utilizado en aplicaciones varias como por ejemplo, antidetonantes para gasolinas  $Pb(CH_3)_4$ , pigmentos para pinturas, procesos industriales, baterías, materiales de soldadura, tuberías, láminas de protección contra rayos X, municiones, fabricación de vidrio y cristal (PbO), aceleradores de secado en pinturas al óleo, estabilizador en compuestos de (PVC), entre otros, y aunque actualmente todavía es utilizado en ciertas aplicaciones, la tendencia actual es reducir su uso siempre que sea técnica y económicamente viable, debido a su potencial toxicidad.

El plomo se encuentra de manera natural en el medio ambiente, representa aproximadamente el 0,002% de la corteza terrestre, siendo sus minerales más importantes la galena (PbS), la cerusita ( $PbCO_3$ ), la crocoíta ( $PbCrO_4$ ), y la piromorfita ( $Pb_5(PO_4)_3Cl$ ). No obstante, ha sido la actividad humana la que ha generado una concentración suficientemente alta en el medio ambiente como para tener efectos nocivos sobre el propio ser humano y el medio ambiente.

### **8.2.1.- Impacto sobre la vegetación**

La absorción de plomo por las plantas es principalmente a través del suelo, y también puede serlo del aire pero en pequeñas cantidades. El plomo afecta al crecimiento de las plantas, sobre todo a partir de los 5 (ppm), provocando una decoloración y anomalía morfológica. La fotosíntesis, la respiración, y otros procesos de intercambio metabólico también se ven afectados. También reduce la asimilación de los nutrientes del suelo. En comparación con la toxicidad sobre el ser humano, la fitotoxicidad del plomo es relativamente baja. La contaminación de las plantas, afecta a la cadena trófica, una vez son consumidas por organismos superiores, aves, mamíferos, seres humanos, etcétera.

### **8.2.2.- Impacto sobre los animales**

La acumulación de plomo en los animales también puede tener un efecto tóxico sobre éstos, y dañar seriamente su salud, pudiendo provocarles la muerte.

Algunos organismos como los crustáceos y otros animales invertebrados son especialmente sensibles al plomo, ya que tiende a depositarse en los huesos, pero al carecer estos animales de esqueleto óseo, el plomo queda retenido en su organismo, pudiendo provocar mutaciones incluso en pequeñas concentraciones.

Se han documentado casos en los que crías de algunos crustáceos a los que se había diagnosticado efectos similares al saturnismo, tenían extremidades más largas o deformidades, y comportamientos especialmente agresivos, siendo la causa la alteración genética provocada por la contaminación de plomo.

### **8.2.3.- Impacto sobre el agua**

En el medio acuático, los compuestos insolubles del plomo precipitan y se adsorben sobre los sedimentos del suelo, o se adhieren sobre partículas en suspensión, principalmente partículas de arcilla. Las plantas acuáticas son susceptibles de acumular plomo, viéndose inhibida la oxidación bioquímica de las sustancias orgánicas a concentraciones de plomo superiores a 0,1 ml/l.

De manera genérica se puede decir que la toxicidad en los peces se produce a unos niveles de concentración de 0,3 mg/l de plomo, aunque hay especies más sensibles que otras.

El agua subterránea también puede verse afectada por los compuestos hidrosolubles del plomo, como por ejemplo el cloruro de plomo y el nitrato de plomo, aunque esto sólo ocurre con índices de contaminación muy altos.

Por lo que respecta a las canalizaciones de agua en las cañerías de plomo, y con agua rica en carbonatos, se forman depósitos de carbonato de plomo en las paredes interiores de las tuberías, aunque hoy en día no están permitidas las tuberías de plomo. Estas cañerías de plomo pueden verse atacadas por la corrosión.

En los océanos y mares, sobre todo en las zonas costeras donde no hay fuertes corrientes, una alta contaminación por plomo puede hacer que se deposite sobre el fondo marino envenenando a los organismos, y afectando a la cadena trófica. El fitoplancton es una fuente de producción de oxígeno que sirve también como alimento para otros seres vivos como peces o ballenas, y puede verse seriamente afectado por el plomo. Esto tiene un doble efecto, ya que además de no generar oxígeno, se consume una cantidad del oxígeno disuelto en el agua para su descomposición.

El plomo es actualmente utilizado en baterías, y debido a la gran cantidad de residuo que se genera, esto obliga a realizar un control estricto de su eliminación una vez transcurrida la vida útil de las baterías, para evitar la contaminación del medio ambiente, especialmente del medio acuático.

El plomo no se degrada con el tiempo, pero los compuestos de plomo pueden verse afectados por la luz natural, el aire o el agua.

#### **8.2.4.- Impacto del plomo sobre el aire**

Cuando grandes cantidades de plomo son liberadas a la atmósfera, principalmente debido a procesos de combustión, estos compuestos de plomo pueden adherirse sobre partículas de polvo y ser transportados a grandes distancias con respecto al foco emisor, para acabar depositándose sobre el suelo o agua, aunque lo normal es que sean precipitados sobre la superficie por la lluvia, la humedad, o el peso de las partículas sin llegar a distancias excesivamente largas.

Una fuente muy importante de contaminación del aire con plomo, era debido a la utilización de gasolinas con plomo, algo que en la actualidad está prohibido. En la combustión de estas gasolinas se introducían en la atmósfera grandes cantidades de sales de plomo, a través de los tubos de escape de los vehículos.

#### **8.2.5.- Impacto sobre el suelo**

La adsorción de los compuestos de plomo sobre el suelo, depende de su composición, siendo el pH una variable importante.

## 9.- Estudio económico general

Una vez conseguidos los objetivos del proyecto e implantado industrialmente, se ha evidenciado que efectivamente se ha producido una importante reducción en los costes. A continuación se hace una descripción del impacto económico que ha supuesto, aunque en algunos apartados por razones de confidencialidad no se indica la estimación en euros.

### 9.1.- Reducción en costes de no calidad derivados de reclamaciones de cliente

Se ha comprobado una mejora muy importante en la calidad del producto estañado con la aleación libre de plomo, lo que ha provocado una reducción en la cantidad de reclamaciones por parte del cliente, así como una reducción de los costes de no calidad asociados a estas reclamaciones.

Comparando el número de reclamaciones y sus costes directos e indirectos, entre los 5 primeros meses del 2010 con los cinco primeros meses del año 2009, se evidencia que ya se ha amortizado sobradamente todo el coste de la inversión para llevar a cabo todo el proyecto. Sólo con el beneficio en este aspecto, se puede considerar que el resultado del proyecto ha sido un éxito. No obstante, no es posible dar información detallada de estos costes, pero sí que se han reducido en aproximadamente un 50%.

### 9.2.- Reducción en costes derivados del control del proceso

Inicialmente se planteó la compra de un equipo para analizar en la propia empresa la concentración de las probetas, pero fue descartado debido al coste que suponía, (coste de compra: aproximadamente 50 000 €, a lo que habría que añadir el coste de mantenimiento y calibración anual).

El hecho de que no se necesite realizar análisis químicos para conocer la concentración de la aleación supone un ahorro, que se resume a continuación,

Los costes indicados a continuación corresponden a la situación anterior a la realización del proyecto,

- 1.- Coste de realización de un análisis: 100 euros
- 2.- Nº de máquinas donde se realiza el proceso: 2
- 3.- Frecuencia realización análisis para cada máquina: Semanal
- 4.- Nº de semanas laborales al año: 48
- 5.- Coste del transporte: 48 envíos al año, con un coste estimado de 50 euros transporte. En cada envío se entregan las dos probetas, (una de cada máquina).

#### Cálculo del coste total antes del proyecto:

$$(2 \text{ análisis/semana}) \times (100 \text{ €/análisis}) \times (48 \text{ semanas/año}) + (48 \text{ envíos/año} \times 50 \text{ €/envío}) = 12000 \text{ €/año}$$

A continuación se indican los costes para la situación actual,

- 1.- Coste de realización de un análisis: 100 euros (Debido a que sólo son dos análisis cada dos meses se ha llegado a un acuerdo con la empresa suministradora para hacerlo sin coste)
- 2.- Nº de máquinas donde se realiza el proceso: 2
- 3.- Frecuencia realización análisis para cada máquina: Bimensual
- 4.- Coste del transporte: 6 envíos al año, con un coste estimado de 50 euros transporte.

#### Cálculo del coste total después del proyecto:

$$(12 \text{ análisis/año}) \times (0 \text{ €/análisis}) \times + (6 \text{ envíos/año} \times 50 \text{ €/envío}) = 300 \text{ €/año}$$

Cálculo del ahorro (antes y después del proyecto):

Ahorro total por año (antes y después del proyecto) = 12 000 € - 300 Ω = 11 700 €

**9.3.- Optimización en los consumos de aleación**

Por lo que respecta al refresco de la aleación con estaño puro se ha comprobado que frecuentes adiciones de poca cantidad, son mucho más beneficiosas que pocas adiciones pero de muchos kilos, como se hacía anteriormente.

Esto es debido principalmente a que la homogeneización es más sencilla y mejor. Por tanto, frecuentes adiciones tienen las siguientes ventajas (ahorro económico).

- 1.- Reducción del tiempo de homogeneización. El tiempo necesario total para homogeneizar adiciones de poca cantidad, es inferior al tiempo necesario para la misma cantidad pero adicionada de una sola vez.
- 2.- El consumo total de estaño puro se reduce si adicionamos poco a poco, que si vamos haciendo adiciones grandes, (desperdicio de materia prima).

**9.4.- Reducción de otros costes directos e indirectos**

Como se ha indicado anteriormente, se ha estudiado al detalle cuál ha sido el beneficio para la organización de la ejecución del proyecto, detectándose que por una parte está el ahorro que podemos cuantificar en euros, como por ejemplo el explicado en los dos apartados anteriores, y otro que quizá no se pueda cuantificar o sea demasiado complejo.

A continuación se indica una relación de variables en las que se ha detectado una mejora, que de una manera directa o indirecta, y en mayor o menor medida, han supuesto un ahorro para la organización. Algunas de ellas se podrían cuantificar, pero debido a que en comparación con el ahorro obtenido en el apartado 9.1 son relativamente muy pequeñas, no se procede a desglosar.

- 1.- Al controlar la temperatura de la aleación y asegurar que no sobrepase un valor máximo, se consiguen las siguientes mejoras.
  - 1.1.- Menor consumo energético.
  - 1.2.- Menor generación de escoria.
  - 1.3.- A menos escoria, menor generación de humo, por tanto mejora para la salud del operario.
  - 1.4.- Menor desgaste para la maquinaria y sus elementos, (bombas, boquillas, etcétera).
  - 1.5.- Menos averías de la maquinaria.
- 2.- Menos paros de línea y tiempos improductivos.
- 3.- Necesidad de menos controles sobre el producto y sobre el proceso.
- 4.- Optimización de consumos de materias primas.
  - 1.- Mejora de la imagen de la compañía ante los clientes.
  - 2.- Mejora en el ambiente de trabajo interno.
  - 3.- Reducción del tiempo necesario por el personal para atender las reclamaciones de los clientes.
  - 4.- Cuando se produce una reclamación normalmente suele requerirse reposición inmediata, lo que implica tener que realizar una producción urgente, afectando a la planificación de la producción.

## 10.- Conclusiones finales del proyecto

Los objetivos fijados al inicio del proyecto han sido conseguidos. Actualmente se está desarrollando en EUROCI el proceso de estañado con la aleación libre de plomo 99,3Sn/0,7Cu de manera satisfactoria y optimizada. Se ha evidenciado una mejora muy importante en el control y estabilidad del proceso, así como una reducción de costos de no calidad según lo que se había previsto, sobre todo porque el número de reclamaciones de los clientes está siendo muy inferior. En definitiva, tal y como se está trabajando a día de hoy la calidad del producto está asegurada.

Es necesario recordar que el proyecto partía de unos conocimientos y experiencia previa con este proceso, ya que se estaba realizando desde hacía algún tiempo. No obstante, no estaba suficientemente controlado y se desarrollaba en unas condiciones inadecuadas, lo que generaba múltiples costos de no calidad y problemas varios.

Para la realización del proyecto se recopiló toda la información disponible y se realizó un trabajo de mejora y optimización total del proceso. De todos los apartados explicados en este informe, el estudio para controlar la concentración de cobre y plomo en la aleación no se puede considerar como una continuación o mejora de lo que ya había, sino algo totalmente innovador y de lo que no se tenía ninguna base. Este apartado ha sido precisamente y con gran diferencia, el apartado más importante y complejo del proyecto, quizá un 90%.

En consecuencia, el estudio correspondiente a este apartado supone el eje principal del trabajo que he realizado.

Lógicamente, y teniendo en cuenta que se trata de un proyecto realizado en una empresa, ha sido necesaria la colaboración del resto del personal técnico y de calidad. Igualmente se ha trabajado con mucha información interna, siendo la principal fuente de información sobre la que me he basado. Por todo ello hay ciertos datos que no han podido ser incluidos en el presente informe, así como algunos resultados que se pueden considerar como confidenciales.

## **11.- Agradecimientos**

Para la realización del proyecto se ha contado con la colaboración y soporte del equipo técnico y de calidad de la empresa EUROCI.

Igualmente se ha contado con la colaboración del departamento de física, del servicio de análisis químico de la Universidad Autónoma de Barcelona (UAB).

Por toda esta colaboración quiero dar un agradecimiento,

A todo el equipo de EUROCI, en particular a,

*Sr. Manuel Morales (Director de Calidad)*

*Sr. Quintín Fernández (Departamento de I+D)*

*Sr. Juan Francisco Delgado (Departamento de I+D)*

Al Departamento de Física y al Servicio de análisis químico personal de la UAB, en particular a,

*Dra. Maria Dolors Baró*

*Dr. Santiago Suriñach*

## 12.- Bibliografía

- Directiva 2002/95/CE del Parlamento Europeo y del consejo, 27 de enero del 2003 sobre restricciones a la utilización de determinadas sustancias peligrosas en aparatos eléctricos y electrónicos. (1)
- Directiva 2000/53/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 18 de septiembre del 2000, relativa a los vehículos al final de su vida útil. (1)
- Directiva 2002/96/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 27 de enero de 2003, sobre residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE). (1)
- Documentación interna de EUROCIIR, (especificaciones técnicas, fichas de seguridad y certificados de materia prima, información del impacto medio ambiental, diagramas de fase, información técnica y de calidad, entre otra). (2)
- Introducción a la Ciencia e ingeniería de los materiales, William D. Callister Jr., (Editorial Reverté, S.A.)
- Ciencia e ingeniería de los materiales, Askeland Donald R., (Tercera edición)

### Observaciones:

- (1) La legislación aplicable es mucho más extensa. Sólo se hace referencia a las directivas europeas más importantes, y no a las modificaciones posteriores a dicha legislación, ni a las transposiciones a la legislación nacional.
- (2) La información propia de la empresa ha supuesto la fuente principal de información para la realización del proyecto.

## ANEXO 1

### Descripción de los acrónimos y siglas utilizados en el proyecto

I+D+i: [Investigación + Desarrollo + innovación](#)

SCO: [Silver Cross Over](#) (Tecnología de fabricación por puentes de plata)

PTH: [Plated Through Hole](#) (Tecnología de fabricación recubrimiento taladros con cobre)

STH: [Silver Through Hole](#) (Tecnología de fabricación recubrimiento taladros con plata)

OSP: [Organic Solderability Preservative](#) (Pasivado Orgánico)

SMD: [Surface Mounting Devices](#) (Dispositivos de Montaje Superficial)

RoHS: [Restriction of Hazardous Substances](#) (Restricción de sustancias peligrosas)

EDL: [Directiva 2000/53/CE](#) relativa a los vehículos al final de su vida útil

HASL: [Hot Air Solder Lever](#) (Proceso de soldadura por aire en caliente)

AMFE: [Análisis Modal de Fallos y Efectos](#)

UAB: [Universitat Autònoma de Barcelona](#)

NPR: [Nivel de Prevención de Riesgo](#)

PVC: [Policloruro de Vinilo](#)

PPM: [Partes Por Millón](#)

EPA: [Environmental Protection Agency](#) (Agencia de protección medio ambiental)

OMS: [Organización Mundial de la Salud](#)