

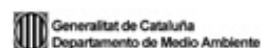
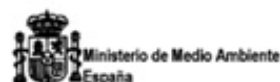
MEDITERRANEO

Alternativas de prevención
de la contaminación en el sector de
Tratamiento de superficies

producen

LIMPIA

Centro de Actividad Regional para la Producción Limpia (CAR/PL)
Plan de Acción para el Mediterráneo



Nota: Esta publicación puede ser reproducida total o parcialmente, con fines educativos y no lucrativos, sin permiso específico del Centro de Actividad Regional para la Producción Limpia (CAR/PL), siempre y cuando se mencione el origen de la información. El CAR/PL agradecería recibir una copia de cualquier publicación donde este material sea usado como fuente.

No está permitido el uso de esta información con fines comerciales o de venta sin permiso escrito del CAR/PL.

Si considera que algún punto del estudio puede mejorarse o existe alguna imprecisión, le agradeceríamos nos lo comunicase.

Estudio terminado en noviembre de 1999

Publicado en mayo de 2000

Revisado en marzo de 2002

Si desea solicitar copias adicionales o para cualquier información adicional, póngase en contacto con:

Centro de Actividad Regional para la Producción Limpia (CAR/PL)

C/ París, 184 – 3ª planta

08036 Barcelona (España)

Tf. +34 93 415 11 12 - Fax. +34 93 237 02 86 - e-mail: cleanpro@cema-sa.org

Web: www.cema-sa.org

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	5
2. DESCRIPCIÓN DE LOS PROCESOS DE TRATAMIENTO DE SUPERFICIES	7
2.1 LOS BAÑOS DE PREPARACIÓN DE LA SUPERFICIE.....	7
2.1.1 <i>Pretratamiento mecánico</i>	7
2.1.2 <i>Decapado mecánico</i>	8
2.1.3 <i>Desengrase químico</i>	8
2.1.4 <i>Desengrase por ultrasonidos</i>	9
2.1.5 <i>Desengrase electrolítico</i>	9
2.1.6 <i>Activado ácido/decapado</i>	10
2.2 LOS PRINCIPALES PROCESOS GALVÁNICOS.....	10
2.2.1 <i>Cincado electrolítico y pasivación</i>	11
2.2.2 <i>Subcapas y acabados</i>	13
2.2.3 <i>Procesos de conversión de superficie</i>	19
2.2.4 <i>Electropulido</i>	22
2.3 LOS LAVADOS	24
2.3.1 <i>Costes derivados del consumo desmedido del agua</i>	24
2.3.2 <i>Relaciones entre la calidad del lavado y la cantidad de agua necesaria</i>	25
2.3.3 <i>Lavados simples</i>	27
2.3.4 <i>Lavados en etapas</i>	28
2.3.5 <i>Lavados estancos de recuperación</i>	30
2.4 ACONDICIONAMIENTO DE AGUAS.....	31
2.4.1 <i>Tratamiento previo al proceso</i>	31
2.4.2 <i>Tratamiento posterior al proceso: depuración fisicoquímica</i>	32
2.5 CORRIENTES RESIDUALES.....	36
2.5.1 <i>Introducción</i>	36
2.5.2 <i>Corrientes residuales generadas</i>	36
2.5.3 <i>Resumen de las corrientes residuales generadas</i>	39
3. LAS ALTERNATIVAS DE PREVENCIÓN DE LA CONTAMINACIÓN.....	48
3.1 REDUCCIÓN EN ORIGEN DE LA CONTAMINACIÓN	49
3.1.1 <i>Cambio de materiales. Substitución de materias primas</i>	49
3.1.2 <i>Buenas prácticas</i>	56
3.1.2.1 <i>Prolongación de la vida de los baños</i>	56
3.1.2.2 <i>Reducción de arrastres</i>	57
3.1.2.3 <i>Mejoras en los enjuagues y lavados</i>	65
3.1.2.4 <i>Buenas prácticas genéricas</i>	75
3.2 RECICLAJE EN ORIGEN	85
3.2.1 <i>Recuperación de las materias primas</i>	85
3.2.1.1 <i>Desengrase</i>	85
3.2.1.2 <i>Decapado</i>	87
3.2.1.3 <i>Productos de aporte</i>	89
3.2.2 <i>Reutilización del agua</i>	90
3.2.2.1 <i>Técnica de skip</i>	90
3.2.2.2 <i>Reciclaje por intercambio iónico</i>	90
3.2.2.3 <i>Reciclaje por ósmosis inversa</i>	92
3.2.3 <i>Recuperación de los arrastres</i>	93
3.2.3.1 <i>Electrolisis</i>	94
3.2.3.2 <i>Electrodiálisis</i>	94
3.2.3.3 <i>Electro-electrodiálisis</i>	95

3.2.3.4. Ósmosis inversa	96
3.2.3.5. Ultrafiltración	97
3.2.3.6. Evaporación	98
3.2.3.7. Intercambio iónico	99
3.2.3.8. Otras medidas	100
4. ALTERNATIVAS DE TRATAMIENTO	103
4.1 RUPTURA DE COMPLEJOS METÁLICOS	103
4.2 OXIDACIÓN DE CIANUROS.	104
4.3 REDUCCIÓN DE CROMO HEXAVALENTE.....	105
4.4 COAGULACIÓN.....	106
5. OTROS ASPECTOS A CONSIDERAR	108
5.1. LOCALIZACIÓN DE ALMACENES DE PRODUCTOS	108
5.2. GESTIÓN DEL ALMACÉN.....	108
5.3. CUBETAS DE RETENCIÓN	108
5.4. ALIMENTACIÓN DE AGUA	109
5.5. PROTECCIÓN DE CONDUCCIONES.....	109
5.6. DISEÑO DE LAS LÍNEAS DE PROCESO	109
5.7. TRASVASE DE EFLUENTES.....	110
5.8. RECOGIDA DE EFLUENTES	111
5.9. AMBIENTE DE TRABAJO	111
5.10 AUTOMATIZACIÓN Y PROGRAMACIÓN DE LOS PROCESOS	112
6. ANÁLISIS DE LA VIABILIDAD TÉCNICA Y ECONÓMICA DE ALGUNAS DE LAS ALTERNATIVAS	113
7. CONCLUSIONES	141
8. ALGUNOS EJEMPLOS REALES PARA LAS ALTERNATIVAS PROPUESTAS	143
9. BIBLIOGRAFÍA.....	144
10. ENTIDADES Y PERSONAS QUE HAN COLABORADO EN LA ELABORACIÓN DE ESTE INFORME.	145
11. PÁGINAS WEB DE UTILIDAD RELACIONADAS CON EL PROYECTO	146
12. FOTOGRAFÍAS SOBRE ALTERNATIVAS DE MINIMIZACIÓN	147

1. INTRODUCCIÓN

El Centro de Actividad Regional para la Producción Limpia (CAR/PL) del Plan de Acción para el Mediterráneo ha realizado este **Estudio sobre Alternativas de Prevención de la Contaminación en el Sector de Tratamiento de Superficies** con el objeto de presentar las oportunidades de prevención en origen de la contaminación que puedan ser implantadas en las industrias mediterráneas de este sector.

El sector de tratamiento de superficies está formado por empresas, principalmente pequeñas y medianas, dedicadas a modificar la estructura inicial de una superficie –metálica o no – para ofrecerle unas condiciones de resistencia a los agentes externos, de acabado final decorativo, etc. Se trata, fundamentalmente, de talleres con un nivel medio-bajo de tecnificación, como término medio. La utilización de gran variedad de compuestos químicos, muchos de los cuales pueden ser altamente tóxicos y contaminantes, es otra de las características del sector.

La racionalización de los consumos y las mejoras en las operaciones internas encaminadas hacia la prevención en origen de la contaminación y la ecoeficiencia aportan ventajas para la empresa que las lleva a cabo, ventajas de tipo económico, ambiental y social al reducir los impactos sobre el medio. Asimismo, se reducen las corrientes residuales generadas y su carga contaminante, se ahorra agua y materias primas y se mejora la imagen pública de la empresa. Todas estas ventajas suponen un valor añadido para la empresa que las lleva a cabo, que aumenta así su capacidad competitiva.

El presente estudio se divide en 5 capítulos y un apartado final de conclusiones y recomendaciones. El primer capítulo¹ describe los principales procesos del sector desde los baños iniciales de pretratamiento y acondicionamiento, pasando por los principales procesos galvánicos y los lavados, punto importante del proceso, ya que es en este donde se pueden encontrar las principales alternativas para reducir el volumen de los efluentes generados. También se incluye una sección que describe las corrientes residuales que se generan en las diferentes actividades relacionadas con los procesos galvánicos.

El segundo capítulo presenta las alternativas de prevención de la contaminación que se encaminan hacia la reducción en origen: cambio de materiales y aplicación de buenas prácticas ambientales, y el reciclaje en origen: recuperación de materias primas, reutilización del agua y recuperación de los arrastres.

¹ El primer capítulo corresponde al capítulo 2 de este estudio y así sucesivamente en el resto de capítulos.

El tercer capítulo describe el proceso clásico de tratamiento de las aguas residuales generadas y las alternativas existentes para dicho tratamiento.

El cuarto capítulo describe, mediante ejemplos, un conjunto de recomendaciones varias encaminadas a reducir el riesgo de contaminación, ya sea del lugar de trabajo o del medio ambiente. Y por último, el quinto capítulo expone los aspectos a tener en cuenta para realizar la valoración tanto técnica como económica de las alternativas existentes, a fin de aplicarlas a la realidad concreta de cada empresa.

También se incluye un apartado final en el que se presentan algunos ejemplos reales de empresas que han implantado alternativas de prevención de la contaminación y corresponden a casos prácticos de fichas Med Clean que publica el CAR/PL.

Este estudio va dirigido, principalmente, a profesionales e industriales del sector del tratamiento de superficies con el objetivo de presentarles oportunidades de prevención de la contaminación para que, según la realidad de cada empresa, disminuyan gastos innecesarios y prácticas poco eficientes y opten por implantar estrategias y oportunidades de prevención aplicables a este sector.

2. DESCRIPCIÓN DE LOS PROCESOS DE TRATAMIENTO DE SUPERFICIES

2.1 Los baños de preparación de la superficie

En todo proceso galvánico, antes de proceder al recubrimiento superficial de la pieza, se requiere un tratamiento previo de preparación de la superficie para eliminar todos los restos de grasa y de óxidos que ésta contiene. En general, dichos restos vienen con la pieza y se generan en el tratamiento de conformación mecánica de la misma.

Igualmente, las piezas pueden sufrir un pulido mecánico a fin de mejorar su estado superficial, eliminándose también, de este modo, cualquier grasa que pudiera quedar.

Son muy variados los sistemas de preparación de la pieza, en función del material de base y de la naturaleza de los restos a eliminar. Entre éstos, los más frecuentes dentro del sector son:

- pretratamiento mecánico
- decapado mecánico
- desengrase químico
- desengrase con ultrasonidos
- desengrase electrolítico
- activado ácido/decapado

2.1.1 Pretratamiento mecánico

El pretratamiento es la preparación de las piezas para el posterior proceso galvánico. Habitualmente, el pretratamiento se clasifica en dos grupos: preliminar y final.

El pretratamiento preliminar consiste en eliminar mecánicamente elementos sucios y residuales presentes en la superficie de las piezas, tales como restos de pastas de pulir, polvo, grasa, gotas de aceites, manchas de óxido, etc. Aunque esta fase puede formar parte del propio proceso productivo, normalmente se considera previa a éste.

El pretratamiento final elimina con medios mecánicos sólo los últimos restos grandes de aceites y grasa, acondicionando la pieza para el proceso galvánico propiamente dicho.

En cualquier ciclo de pretratamiento en el que las piezas a tratar presentan tanto restos de aceites como de óxido, es una buena práctica eliminar mecánicamente dichos contaminantes antes de

introducir las piezas en la línea de proceso, ya que esto facilitará la eliminación más uniforme de aceites y óxidos, posteriormente.

2.1.2 Decapado mecánico

Consiste en proyectar a gran velocidad, mediante aire comprimido, un material agresivo en estado sólido (arena de sílice, escorias, granalla de acero, etc.) sobre la superficie en cuestión. Con este sistema, se van eliminando las capas de impurezas que se encuentran adheridas a la superficie a tratar. El material agresivo que se utiliza depende de diferentes factores, como el rendimiento del producto, la posibilidad de recuperación, el aspecto deseado del acabado y del material de base de la pieza.

2.1.3 Desengrase químico

En este caso, se procede a la inmersión de la superficie a tratar en una solución química, durante un tiempo prefijado, empleando disolventes, detergentes o por electrólisis.

En el **desengrase con disolventes**, éstos son utilizados tanto en fase vapor como en frío. Eliminan las grasas, las pinturas y los barnices.

En fase vapor, se utilizan normalmente disolventes clorados, los cuales se hacen evaporar en el baño para producir los vapores disolventes.

A continuación, citamos los disolventes más utilizados actualmente para llevar a cabo el desengrase:

- tricloroetano, tricloroetileno y percloroetileno,
- cloruro de metileno,
- triclorofluoretano,
- cloroformo, como básicos.

En el caso de utilización del desengrase con disolventes en frío, se emplean los mismos compuestos, pero se aplican por inmersión.

En el **desengrase químico con detergentes** (comerciales), se consigue eliminar cualquier tipo de grasa gracias a la presencia de elementos tensoactivos que disminuyen la tensión superficial del baño y que se añaden a una solución alcalina.

En los medios alcalinos utilizados para desengrasar las piezas, se puede hallar la siguiente formulación:

- sosa cáustica..... 40 g/l
- carbonato sódico..... 25 g/l
- fosfato trisódico 12·H₂O..... 10 g/l
- metasilicato sódico 5·H₂O..... 10 g/l
- humectantes..... 2-5 g/l

En este medio, las condiciones óptimas de trabajo son las siguientes:

- pH.....12-14
- temperatura.....60-90 °C

Por otra parte, para favorecer el efecto mecánico de la limpieza, normalmente se utiliza algún mecanismo de agitación del medio, como el aire, por ejemplo.

2.1.4 Desengrase por ultrasonidos

Este sistema consiste en un medio químico como el anterior, al que se le añade un mecanismo generador de ultrasonidos que crea un efecto de impacto sobre la superficie de la pieza, colaborando a la limpieza mecánica de ésta.

2.1.5 Desengrase electrolítico

Uno de los sistemas más utilizados es el desengrase electrolítico, que consiste en someter las piezas, actuando como cátodos, a la acción de una solución alcalina. Las grasas saponificables son atacadas y saponificadas por la acción de la solución alcalina y el hidrógeno originado en la electrólisis sobre el cátodo favorece la liberación de las grasas de la pieza. Con este sistema, también se desprenden los óxidos metálicos para su reducción a través del hidrógeno.

La formulación básica del medio es la siguiente:

- sosa cáustica..... 50-60 g/l
- fosfato trisódico 12·H₂O..... 10-20 g/l
- gluconato sódico..... 10-30 g/l

En este caso, las condiciones de trabajo más frecuentes son las siguientes:

- pH..... 12-14
- temperatura..... 80 °C
- densidad de corriente.....5-10 Amp/dm²

2.1.6 Activado ácido/decapado

En esta operación se eliminan sobre todo los óxidos metálicos de la superficie a recubrir.

En función del tipo de óxido a eliminar, se utilizan baños ácidos en frío o en caliente.

Entre los principales compuestos, cabe destacar:

- ácido clorhídrico
- ácido sulfúrico
- agentes inhibidores

También se ha observado la utilización de ambos ácidos mezclados, aunque algunos activadores especiales de metales utilizan el bifluoruro amónico (F₂HNH₄) como sustancia de activación.

Después del decapado, la superficie contiene productos químicos que se generan por la acción de los ácidos sobre los óxidos. A continuación, por consiguiente, se eliminan estos productos mediante su neutralización y posterior lavado con agua corriente.

2.2 Los principales procesos galvánicos

Después de la limpieza completa de la superficie a recubrir de cualquier tipo de grasa u óxido metálico, se somete a un proceso de electrodeposición con un material que le confiere las propiedades anticorrosivas y decorativas deseadas.

En función del material a recubrir y de las características finales que se pretenden del recubrimiento, se utilizan distintas técnicas y materiales. Veremos, seguidamente, los principales procesos de tratamiento que se llevan a cabo.

En el caso de los recubrimientos electrolíticos, el mecanismo de recubrimiento consiste en sumergir la superficie a recubrir, previamente limpiada por alguno de los procedimientos citados anteriormente, en un electrolito adecuado, que posee los iones del metal a depositar; la pieza a recubrir constituye el

cátodo de la cubeta electrolítica. Por otra parte, el ánodo está formado por barras de gran pureza del metal de deposición, cuya misión es mantener constante la concentración de los iones metálicos en el electrolito.

El grosor del recubrimiento se regula mediante la variación de la intensidad de la corriente empleada y del tiempo que dura el proceso. Cabe indicar, asimismo, la presencia de agentes diversos – humectantes, abrillantadores, complejantes, etc.- que, con diversas funciones, forman también parte del baño.

Dentro del sector de industrias de acabado de superficies se pueden encontrar, principalmente, los procesos industriales que se describen a continuación.

2.2.1 Cincado electrolítico y pasivación

Este tipo de proceso es uno de los más difundidos entre las empresas de tratamiento de superficies y, posiblemente, se convierta en uno de los recubrimientos más utilizados para la protección del hierro, dadas sus características anticorrosivas y decorativas.

En la actualidad, existen tres formas básicas de depositar el cinc por vía electrolítica:

- cinc ácido
- cinc alcalino
- cinc cianurado

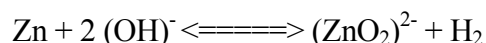
El proceso de **cinc ácido** no es, hoy en día, el proceso de cincado más empleado. Este metal es químicamente activo y se ve atacado por los ácidos diluidos, aunque lo hace lentamente cuando el ácido está concentrado. En algunos casos, esto provoca una dificultad a la hora de controlar los parámetros del baño de proceso. La solución ácida está formada principalmente por sulfato o cloruro de cinc, cloruro sódico o potásico, ácido bórico. Así pues, las formulaciones ácidas son de esta forma:

- cloruro de cinc..... 62-85 g/l
- cloruro potásico..... 186-255 g/l
- ácido bórico..... 30-38 g/l
- humectantes..... 60-90 g/l
- abrillantadores..... 0,5-1 g/l

Las condiciones de trabajo en esta formulación son las siguientes:

- Temperatura.....21-35 °C
- Densidad de corriente.....1-4 Amp/dm²
- Tensión.....1-18 V
- pH.....4,8-5,4

Más utilizada que la anterior es la **solución de cinc alcalina**. En este caso, el cinc reacciona con los álcalis dando cincatos solubles, según la siguiente reacción, en la que también se libera hidrógeno:



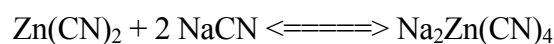
En este caso, la formulación básica más frecuente es la siguiente:

- óxido de cinc.....9,5 g/l
- hidróxido sódico.....90-120 g/l
- abrillantadores.....10-50 ml/l

Las condiciones de trabajo, en este caso, son:

- Temperatura.....20-30 °C
- Densidad de corriente catódica.....2-4 Amp/dm²
- Voltaje.....2-15 V

El último tipo de cincado, siendo más usado que el cincado ácido y alcalino, es el **cincado cianurado**, en forma alcalina, que se basa en la siguiente reacción:



Las formulaciones básicas dependen fundamentalmente de la concentración de cianuro sódico, variando del siguiente modo:

Tipo de baño	Alto cont.	Cont. medio	Bajo cont.
Cianuro de cinc	60	30	10
Cianuro sódico	42	20	7,5
Sosa cáustica	80	75	65
Polisulfuro sódico	2	2	-
Abrillantadores	1-3	1-4	1-5

Tabla 1

valores en g/l

En cuanto a las condiciones de trabajo, las más usuales son las siguientes:

- Temperatura.....20-30 °C
- Densidad de corriente catódica.....2-6 Amp/dm²
- Voltaje.....2-15 V

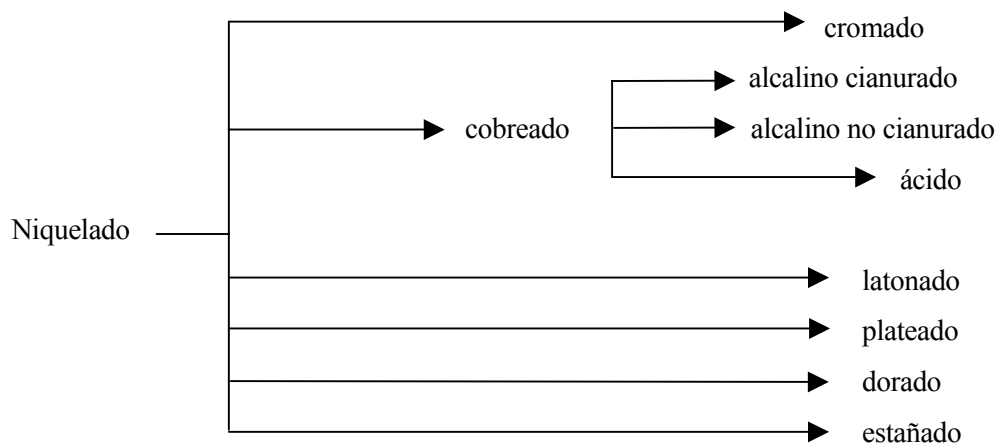
Un vez se ha realizado el proceso de cincado de las piezas, para incrementar su resistencia a la corrosión, se las somete a un **proceso de pasivación crómica o cromatizado**. Esta pasivación puede ser de cuatro tipos:

- pasivación azul (baja resistencia a la corrosión)
- pasivación verde (alta resistencia a la corrosión)
- pasivación amarilla (resistencia a la corrosión similar a la anterior)
- pasivación negra (resistencia de tipo medio)

Hasta ahora se sigue utilizando el cromo hexavalente en las formulaciones para la pasivación.

2.2.2 Subcapas y acabados

El sector de tratamiento de superficies lleva a término un gran número de acabados anticorrosivos y decorativos. En muchos casos, antes del acabado final, encontramos una subcapa de níquel que favorece la resistencia a la corrosión y a la posterior electrodeposición del metal que ofrecerá el acabado final. En el siguiente esquema, se resumen los principales baños de subcapas y acabados.



Por lo tanto, como podemos apreciar, el niquelado electrolítico se utiliza en gran número de casos como base para recubrir con otros metales, como por ejemplo:

- cromo
- oro
- plata
- latón, entre otros

Este tipo de proceso es el que se denomina general.

El proceso de **niquelado** se utiliza normalmente como subcapa para tratar:

- hierro
- aluminio y sus aleaciones
- latón
- cobre
- cinc y sus aleaciones

En algunos casos particulares, las piezas se acaban con un recubrimiento de níquel químico de características específicas (dureza, lubricación, etc.).

Dado que las reacciones que se producen en el niquelado químico son catalíticas, es decir, las inicia el mismo material a recubrir, es muy importante en este tipo de recubrimiento conseguir una buena adherencia y, por lo tanto, limpiar muy bien las piezas a tratar.

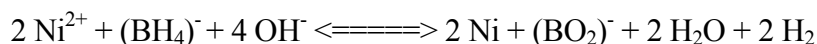
La formulación básica encontrada es:

- sulfato de níquel 7·H₂O..... 250-350 g/l
- cloruro de níquel 6·H₂O..... 60-90 g/l
- ácido bórico..... 30-60 g/l
- abrillantadores..... 20-30 g/l
- humectantes..... 2-5 g/l

Con estas materias primas, las condiciones de trabajo requeridas son las siguientes:

- temperatura.....50-65 °C
- densidad de corriente.....1-10 Amp/dm²
- pH.....4-5
- tensión.....1-16 V

La reacción general que tiene lugar para la deposición del níquel es la siguiente:



Como ya se ha comentado, el niquelado electrolítico se emplea en muchos casos como base para favorecer la deposición de otro metal (cromo, principalmente).

En los **baños de cromo** estudiados, como materias primas de uso más generalizado, cabe destacar:

- trióxido de cromo..... 150-400 g/l
- ácido sulfúrico..... 2,5-4 g/l
- catalizadores..... 0,5-1 g/l

Las condiciones de trabajo seguidas son:

- temperatura..... 40-50 °C
- densidad de corriente..... 5-55 Amp/dm²
- ánodos insolubles..... 93% Pb, 7% Sn

El baño de **cobreado** también se utiliza bastante dentro del sector. La formulación del baño es variada y se puede clasificar según:

- cobre alcalino cianurado
- cobre alcalino sin cianuros
- cobre ácido con ácido sulfúrico
- cobre ácido con ácido bórico

Para el cobre alcalino cianurado, la composición es:

- Cianuro de cobre..... 22,5 g/l
- Cianuro sódico..... 34,0 g/l
- Carbonato sódico..... 15,0 g/l
- Hidróxido sódico..... control de pH

En cuanto a las condiciones de trabajo, son éstas:

- temperatura..... 32-43 °C
- densidad de corriente..... 10-15 Amp/dm²
- pH..... 12-12,6
- ánodos..... cobre y acero

Se utiliza para grosores, incluso sobre todo tipo de metales de base o como capa de base para nuevas capas de otros tipos de baño de cobre. Por este motivo, su uso está muy extendido. Existe también una versión de alta concentración, que alcanza los 120 g/l de cianuro de cobre y 135 g/l de cianuro sódico.

El baño de cobre alcalino sin cianuros presenta la siguiente composición:

- pirofosfato de cobre.....345,0 g/l
- hidróxido potásico.....18,0 g/l
- amonio (29%).....1 ml/l

En cuanto a las condiciones de trabajo del baño, son éstas:

- temperatura..... 43-60 °C
- pH..... 8,2-9,2
- densidad de corriente..... 1-7,5 Amp/dm²
- ánodos..... cobre

Es una subcapa para baños de níquel brillante y cromo. Se aplica sobre cualquier metal que presente una capa de cobre. También se utiliza en circuitos impresos.

Para el caso del cobre ácido con ácido sulfúrico, la composición del baño está formada por:

- Sulfato de cobre..... 195-248 g/l
- Ácido sulfúrico..... 30-75 g/l

En cuanto a las condiciones de trabajo, son éstas:

- temperatura..... 21-49 °C
- densidad de corriente..... 2-10 Amp/dm²
- ánodos..... cobre

Es un baño aplicable sobre cualquier metal ferroso con base previa de cobre; también se puede utilizar como recubrimiento bajo baños de níquel-cromo, a fin de ofrecer más resistencia a la corrosión. Se utiliza mucho en la fabricación de circuitos impresos, ya que se consiguen capas muy finas de recubrimiento, aunque también permite recubrimientos gruesos.

En cuanto al baño de cobre ácido con ácido bórico, la composición es la siguiente:

- fluoborato de cobre.....225,0 g/l
- ácido fluobórico.....control de pH

Condiciones de trabajo:

- pH.....0,8-1,7
- temperatura.....27-77 °C
- densidad de corriente.....7,5-12,5 Amp/dm²
- ánodos.....cobre

Se trata de un proceso que puede ofrecer cualquier tipo de grosor a las piezas de cualquier metal base que tenga una base de cobre. Utilizado también en la confección de circuitos impresos.

Otro tipo de recubrimiento que utiliza el níquel como base es el de **baño de latón**. En este caso, la formulación más empleada es la siguiente:

- cianuro de cobre 60-75 g/l
- cianuro de cinc 8-30 g/l
- cianuro sódico..... 130-150 g/l
- sosa cáustica..... 3-4 g/l
- amoníaco..... 1- 5 g/l
- abrillantadores..... 1-10 g/l

En este proceso, las condiciones de trabajo son:

- temperatura..... 40-60 °C
- pH..... 9,5-11,5
- densidad de corriente..... 0,5-2 Amp/dm²
- ánodos Cu-Zn..... 80% Cu, 20% Zn

Otro baño que precisa un primer tratamiento con níquel es **el de plata**. La formulación en este proceso es:

- cianuro de plata..... 30-40 g/l
- cianuro potásico..... 160-200 g/l
- abrillantadores..... 0,1-10 g/l

siendo las condiciones de trabajo:

- temperatura..... 22-30 °C
- densidad de corriente.....0,5-2 Amp/dm²
- ánodos..... plata (99,99%)

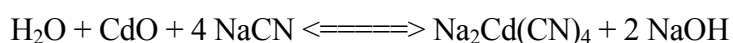
Finalmente, un último proceso, muy común, que también precisa una primera capa de níquel, es el de **baño de oro**. En este caso, la formulación empleada es la siguiente:

- cianuro doble de oro y potasio.....0.5-2 g/l
- fosfato disódico..... 10-20 g/l
- abrillantadores..... 1-5 g/l

Las condiciones de trabajo más utilizadas son las siguientes:

- temperatura.....50-70 °C
- pH.....11-12
- densidad de corriente..... 0,2-0,6 Amp/dm²
- ánodos.....titanio platinizado (inertes)

Aunque no se trata de un proceso tan corriente como los anteriores, cabe citar el **cadmiado electrolítico**, en el que intervienen también los cianuros (cianuro sódico, principalmente) y óxido de cadmio. La reacción que tiene lugar es la siguiente:



La estabilidad del complejo de cadmio formado se favorece por un exceso de cianuro libre en la solución.

Dentro de este tipo de tratamientos generales, cabe mencionar el proceso de recubrimiento con **estaño por baño electrolítico** en el cual intervienen el estannato sódico, acetato sódico, sosa cáustica, perborato sódico y agua. La temperatura de trabajo es de 70 °C. Básicamente, el proceso tiene lugar porque el perborato sódico oxida el ion estannato a estánico.

2.2.3 Procesos de conversión de superficie

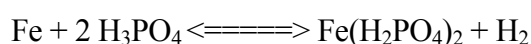
En este grupo de procesos de recubrimiento, se efectúa una reacción química con el metal de base.

Los procesos industriales más importantes hallados son dos:

- **fosfatado y pavonado**, en el caso del hierro y del acero.
- **adonizado del aluminio** y sus aleaciones.

El **fosfatado** consiste en la formación de capas de fosfatos sobre la superficie del metal a tratar. Además de proteger contra la corrosión, este proceso facilita el trabajo mecánico de los metales tratados.

El proceso de fosfatado se consigue introduciendo la pieza a recubrir en una solución diluida de ácido fosfórico, el cual reacciona con el hierro, según la reacción:



Por su parte, el **pavonado** consiste, en esencia, en la oxidación de la superficie controlando el proceso de manera que se forme óxido férrico que, dada su compactabilidad, protege el hierro.

Esta oxidación se consigue de diversas formas:

- electrolíticamente (oxidación anódica), con una solución de agua con hiposulfito.
- químicamente (oxidación alcalina), utilizando hidróxido de sodio y nitrato sódico o potásico.
- asimismo químicamente (baño de sales), con un baño formado por una mezcla de nitratos de sodio y potasio, a los cuales se añade dióxido de manganeso.

Por otra parte, también existe el proceso de **anodizado del aluminio**. La oxidación anódica del aluminio puede considerarse un proceso de pasivado acelerado mediante el paso de la corriente continua. En realidad, se trata de su oxidación por electrólisis y hace actuar como un ánodo la pieza a tratar. Es una aplicación muy importante que, en la mayoría de los casos, sirve para la protección de piezas de aluminio destinadas a la construcción.

El mecanismo que tiene lugar es el siguiente: cuando la corriente eléctrica pasa a través del electrolito, donde las piezas del aluminio a oxidar actúan a modo de ánodo, se forma una capa de óxido de aluminio (alúmina) que va creciendo poco a poco, hasta llegar a grosores del orden de 25-60 micras.

Durante este proceso de oxidación, el oxígeno que se forma en el ánodo es lo que va oxidando el aluminio. Debido al excesivo calor desprendido durante la oxidación, se deshidrata y forma el óxido de aluminio (capa de alúmina).

En este caso, a diferencia de los otros procesos, el tratamiento que se debe dar al aluminio es el siguiente:

1. desengrase químico
2. lavado
3. satinado aluminio (alcalino)
4. lavado
5. decapado ácido nítrico
6. lavado
7. anodizado de ácido sulfúrico
8. lavado
9. coloración
10. lavado
11. sellado con agua caliente

Para efectuar el desengrase químico, la formulación más empleada es la siguiente:

- carbonato sódico.....40 g/l
- metasilicato sódico.....20 g/l
- gluconato sódico.....10 g/l
- fosfato disódico..... 20 g/l
- humectantes.....1-5 g/l

Por su parte, para realizar el proceso de satinado del aluminio, la formulación básica es:

- sosa cáustica.....50-60 g/l
- gluconato sódico.....20-30 g/l
- humectantes..... 1-5 g/l

En el decapado con ácido nítrico, la formulación es:

- ácido nítrico..... 500 ml
- agua.....500 ml

La temperatura de trabajo en este caso es la ambiente.

En cuanto al proceso de anodizado propiamente dicho, hay distintos tipos de electrolitos que son utilizados en la oxidación anódica, aunque el más importante es el ácido sulfúrico a un 20% en peso.

Las condiciones de trabajo halladas son:

- temperatura..... 21-23 °C
- densidad de corriente anódica.....0,5-1,5 Amp/dm²

Dado que en el tratamiento anódico del aluminio, el ácido sulfúrico ataca su superficie disolviéndola parcialmente, cuando la concentración de aluminio en el medio llega a un valor concreto, se debe proceder a la dilución del electrolito.

En algún caso se ha de proceder a la coloración del aluminio mediante la utilización de colorantes adecuados, tanto orgánicos como inorgánicos. La concentración de cada colorante depende de cada caso.

También las condiciones de trabajo dependen de cada colorante en concreto, así como del grado de intensidad de absorción solicitado.

Finalmente, en el proceso de sellado se utiliza agua destilada a 98 °C para hidratar la capa de alúmina.

Para acabar con el estudio de los procesos galvánicos realizados se describe, a continuación, el proceso de electropulido.

2.2.4 Electropulido

El pulido electrolítico consiste en disolver, de manera preferencial, una parte muy pequeña de la pieza, a fin de conseguir un brillo de espejo del acero inoxidable.

La pieza actúa a modo de ánodo, en una cubeta que contiene ácidos concentrados calientes.

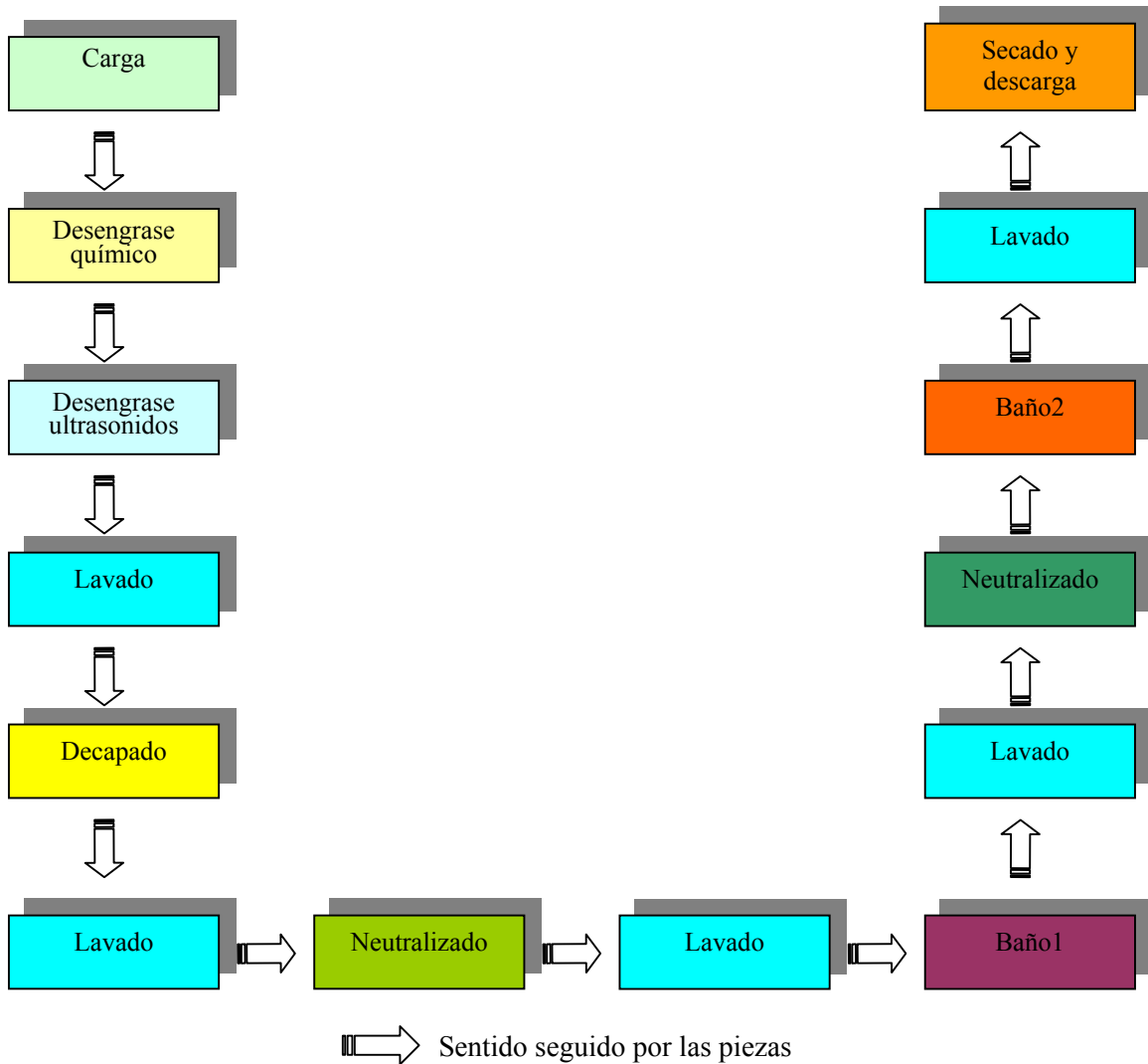
En este caso, la composición del electrolito es la siguiente:

- ácido fosfórico.....90 % (peso)
- ácido sulfúrico.....10 % (peso)
- glicerina..... 1 % (peso)

Así, las condiciones de trabajo son éstas:

- temperatura..... 80-90 °C
- tiempo..... 2-3 minutos
- densidad de la corriente anódica..... 10-50 Amp/dm²

Una vez descritos los principales procesos que forman una línea galvánica, en la siguiente tabla se muestra la secuencia de una línea teórica:



2.3 Los lavados

La operación de lavado es fundamental en los procesos de recubrimientos galvánicos. El caudal de agua necesario para efectuar correctamente el lavado de las superficies tratadas es un parámetro que, normalmente, determina las dimensiones de los sistemas de gestión y tratamiento posteriores.

Este caudal depende de muchos factores y, según como haya sido diseñada la planta galvánica, puede ser muy superior al mínimo necesario. Éste es, por desgracia, un caso muy habitual.

Es, por lo tanto, esencial que el sistema de lavado escogido permita obtener la calidad de lavado necesaria con el mínimo consumo de agua, hecho que, por otro lado, también implica una reducción del caudal de las aguas residuales.

Uno de los factores que más influyen en los caudales de lavado es el arrastre. Éste, por su parte, puede venir condicionado por la forma y rugosidad superficial de la pieza, por la viscosidad de la solución de proceso, etc.

2.3.1. Costes derivados del consumo desmedido del agua

En algunos países del Mediterráneo, el industrial ha de tener en cuenta que, al precio del coste del agua se le pueden añadir otros costes, en función de las necesidades de adecuar el vertido de aguas residuales a la normativa aplicable. Entre estos costes, cabe destacar los siguientes, como más significativos:

1. Impuestos (cánones y tasas). Además, hay que tener en cuenta que muchos de ellos son progresivos, es decir, cuanto más consumo hay de agua más se grava con el impuesto.
2. Gastos de distribución dentro de la fábrica.
3. Coste de mantenimiento de instalaciones de suministro.
4. Energía de bombas y supresores para trasvasarla o agitarla.
5. Inversión en tratamientos de acondicionamiento de sus características (desalinizadores, descalcificadores, etc.).
6. Inversión en recogida de efluentes contaminados.
7. Coste de mantenimiento de instalaciones de evacuación.
8. Inversión en tratamientos de descontaminación (depuración fisicoquímica).
9. Costes operativos de descontaminación (personal, energía, reactivos, recambios, gestión de fangos, etc.).

Reducir el consumo de agua conduce a disminuir la totalidad o parte de estos diversos costes de la empresa.

La experiencia constata que la racionalización de la gestión del agua –y por extensión de las materias– en el taller galvánico, lleva simultáneamente a la mejora en los circuitos de producción, a limitar los tiempos muertos, a reducir el deterioro del ambiente de trabajo y la desgana de los operarios y a mejorar, consiguientemente, la calidad del producto y la productividad de la empresa.

De esta manera, podemos establecer para el sector los siguientes objetivos en relación con el consumo de agua:

1. En algunos países de la cuenca mediterránea, se considera aceptable un consumo máximo de agua, en función de la superficie tratada, de unos 8 l/m^2 , para cada posición de lavado.
2. Reducir, de forma óptima, el consumo de agua para una misma razón de dilución, o mejorar la calidad del lavado sin aumentar el consumo de agua.

2.3.2. Relaciones entre la calidad del lavado y la cantidad de agua necesaria

Cuando el operario de un taller galvánico extrae una pieza de una cuba de la línea de proceso, tanto la pieza como su soporte se llevan parte de la solución acuosa donde estaban sumergidos: al salir mojados, se encuentran recubiertos de una fina película del líquido de la cuba. Este volumen de líquido es lo que se denomina **arrastre**, que se corresponde con un caudal (q), habitualmente, en litros por hora (l/h). De este modo, transferimos de una cuba a otra parte del líquido de la cuba anterior, “contaminándola”.

Para evitar contaminaciones cruzadas entre cubas de proceso, deberá lavarse la pieza y su soporte. Al llegar a este punto, nos encontramos con otro concepto fundamental dentro del sector –y, frecuentemente olvidado o desconocido por el propio industrial– que es **la razón de dilución (Rd)**. Este concepto mide la calidad del lavado en cuestión y, por definición, se tiene que establecer caso por caso.

Sean los siguientes parámetros:

Co = concentración inicial del baño

Cr = concentración media del baño en el agua de lavado

q = arrastre (l/h)

Q = caudal de agua de lavado (l/h)

Rd = Razón de dilución (calidad del lavado)

Las relaciones existentes entre ellos son las siguientes:

$$\mathbf{Rd = Co / Cr = Q / q}$$

De esta manera, una vez fijada la calidad del lavado en cuestión (Rd) y conociendo el arrastre (q) derivado de su producción, el industrial podrá determinar el caudal de agua de lavado necesario para cada posición de lavado².

La cuestión básica es que el arrastre debe ser eliminado por un caudal de agua de lavado que evite la concentración en sales del lavado. Por lo tanto, si tenemos que q es el caudal de arrastre y Q es el caudal de lavado:

- **q Co** es la cantidad de productos que entran en el lavado y,
- **Q Cr** es la cantidad evacuada por el lavado.

Por consiguiente, tenemos que:

$$\mathbf{q Co = Q Cr}$$

Es decir:

$$\mathbf{Q = q Co / Cr = q Rd}$$

$$\mathbf{Q (caudal de lavado) = q (arrastre producido) Rd (razón de dilución o calidad del lavado)}$$

La consecuencia que se deriva de todo esto es que *aumentar el caudal de lavado no es el único medio disponible para mejorar la calidad de lavado*. Podemos alcanzar un alto nivel de calidad de lavado (Rd alto) mediante:

- disminución del caudal de arrastre (q);
- disminución del caudal de lavado con la modificación de la estructura del lavado.

Algunos ejemplos estándares de calidad de lavado (Rd) extraídos de la bibliografía se detallan en la siguiente tabla:

² Para determinar la concentración máxima permisiva del agua de la cuba de lavado se puede tomar la concentración de algún elemento que pueda poner en peligro la calidad del lavado; por ejemplo, en un lavado final, sería suficiente con determinar la concentración en Cl⁻ o, a menudo, se toma como referencia el producto característico del baño (Ni, Zn, CN⁻, etc.).

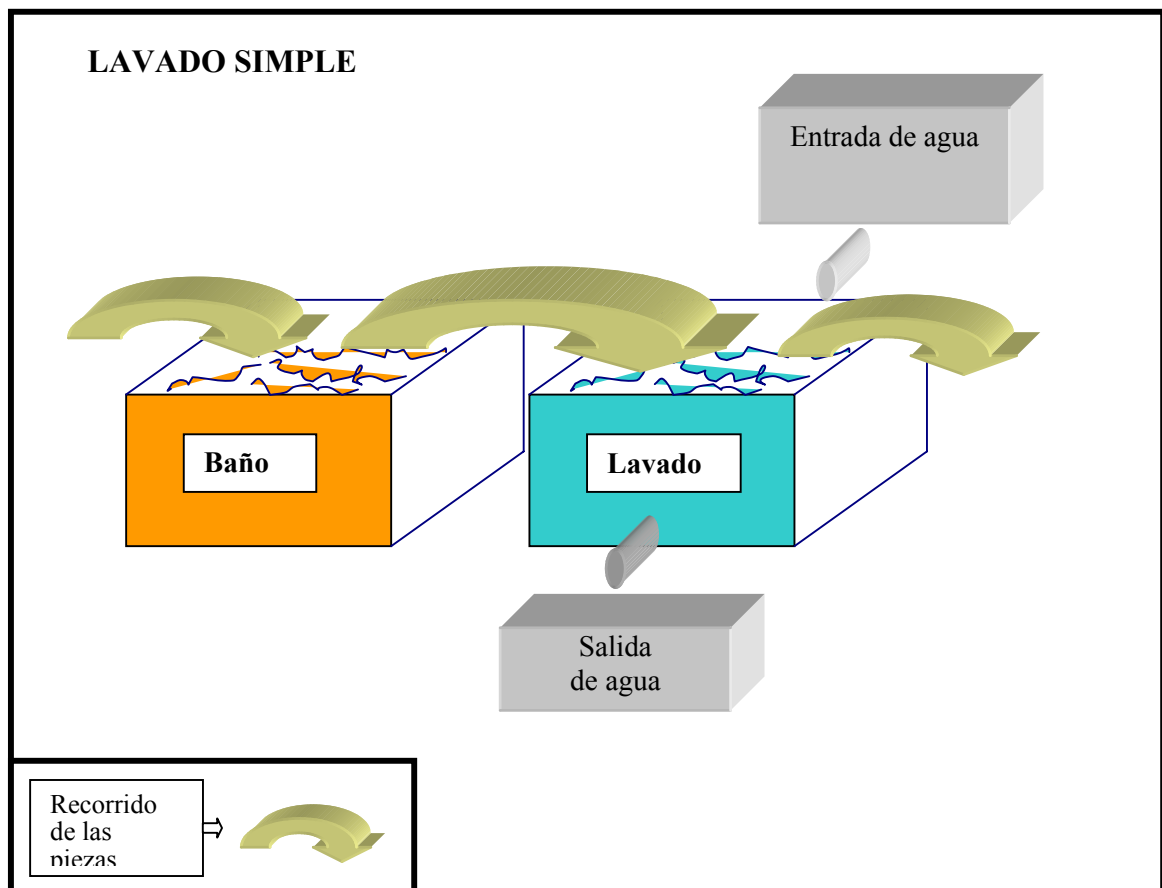
Tipo de proceso	Rd = Co/Cr
Preparación (desengrase, decapado)	500-5.000
Acabados multicapa (Cu, Ni, Cr...) y mayor parte de baños de deposición	5.000-10.000
Pasivado crómico hexavalente	1.000-2.000
Fosfatación hierro, anodizado aluminio	2.000-5.000
Lavados finales críticos	> 10.000

Tabla 2

Como estructuras o sistemas de lavado utilizados en el sector, encontramos los siguientes:

2.3.3 Lavados simples

Es el sistema más extendido entre la inmensa mayoría de empresas del sector galvanico.



En este caso, sólo encontramos una única cubeta de lavado, con agua corriente, después del baño de tratamiento.

Generalmente, el caudal de agua necesario para garantizar una dilución suficiente es muy elevado.

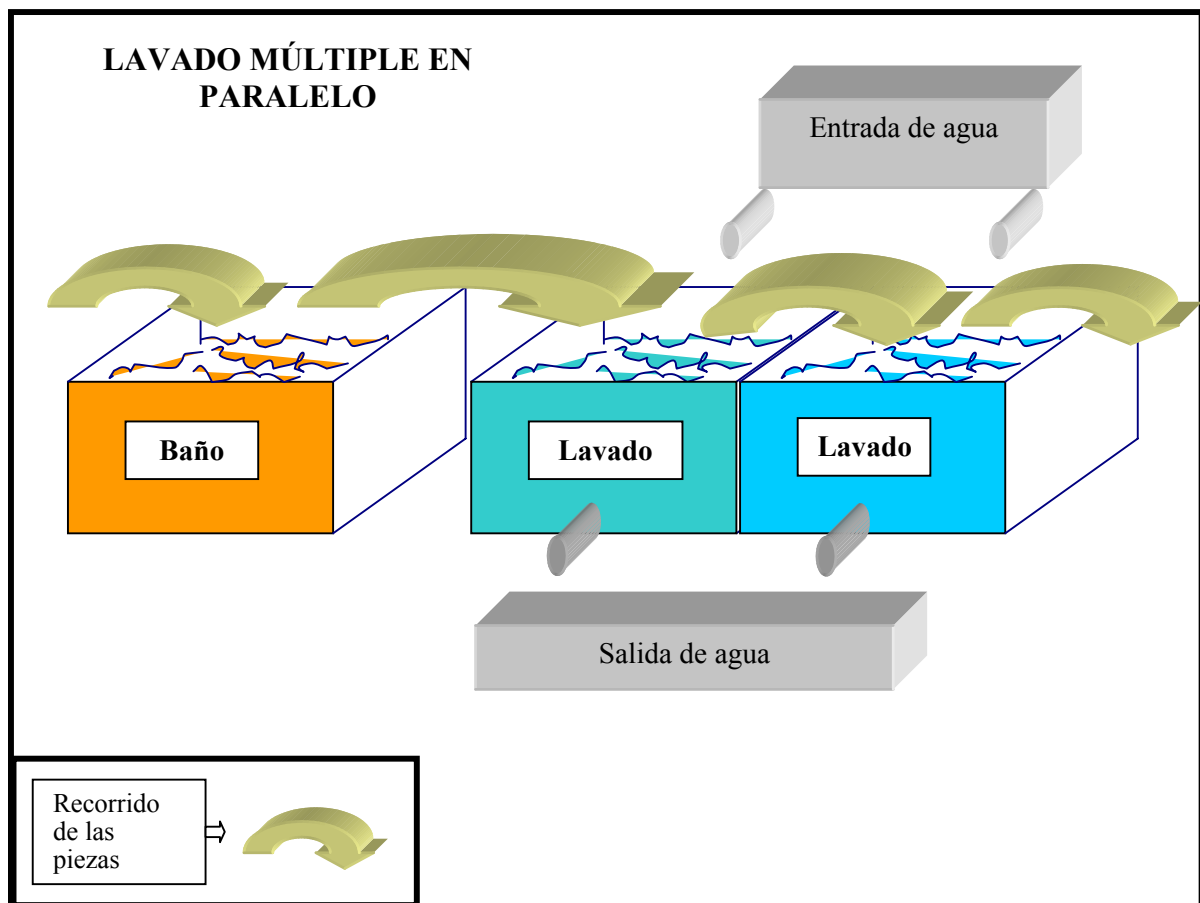
2.3.4 Lavados en etapas

También se denominan lavados múltiples y, habitualmente, son lavados dobles (con dos cubas).

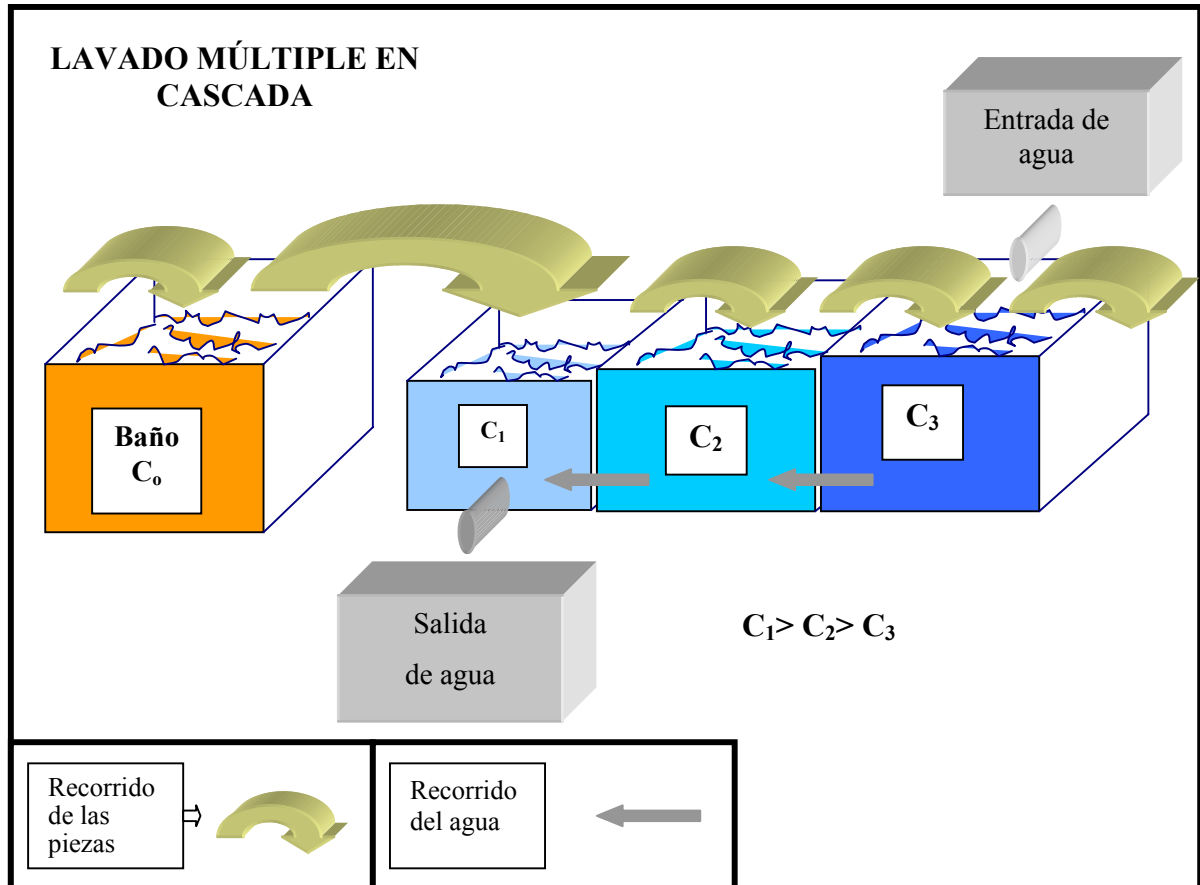
Este sistema de lavado puede ser de dos tipos:

- **Lavado múltiple en paralelo:** Es una buena alternativa a fin de reducir, de manera considerable, el consumo de agua.

Se da cuando existen diversas cubas de lavado en las que cada una de ellas es alimentada, de manera separada, por una entrada de agua (en paralelo).



- **Lavado múltiple en cascada (en serie):** Es, generalmente, el sistema más recomendado (siempre que la planta disponga de suficiente espacio).



Un simple estudio económico pone al descubierto un hecho incuestionable: la inversión que supone la instalación de este sistema es mínima comparada con el ahorro de agua obtenido.

En este caso, el agua limpia se introduce por la última cubeta de lavado y pasa (en cascada) hasta la primera. El sistema, pues, funciona a contracorriente (la circulación de agua se produce en sentido contrario al de la pieza trabajada). De este modo, las piezas siempre se encuentran con un agua cada vez más limpia.

Se puede demostrar, tal y como queda patente en el apartado 3.1.2 de este estudio, que el caudal de agua necesario para un sistema de lavado múltiple, es radicalmente inferior al que precisamos en un sistema simple.

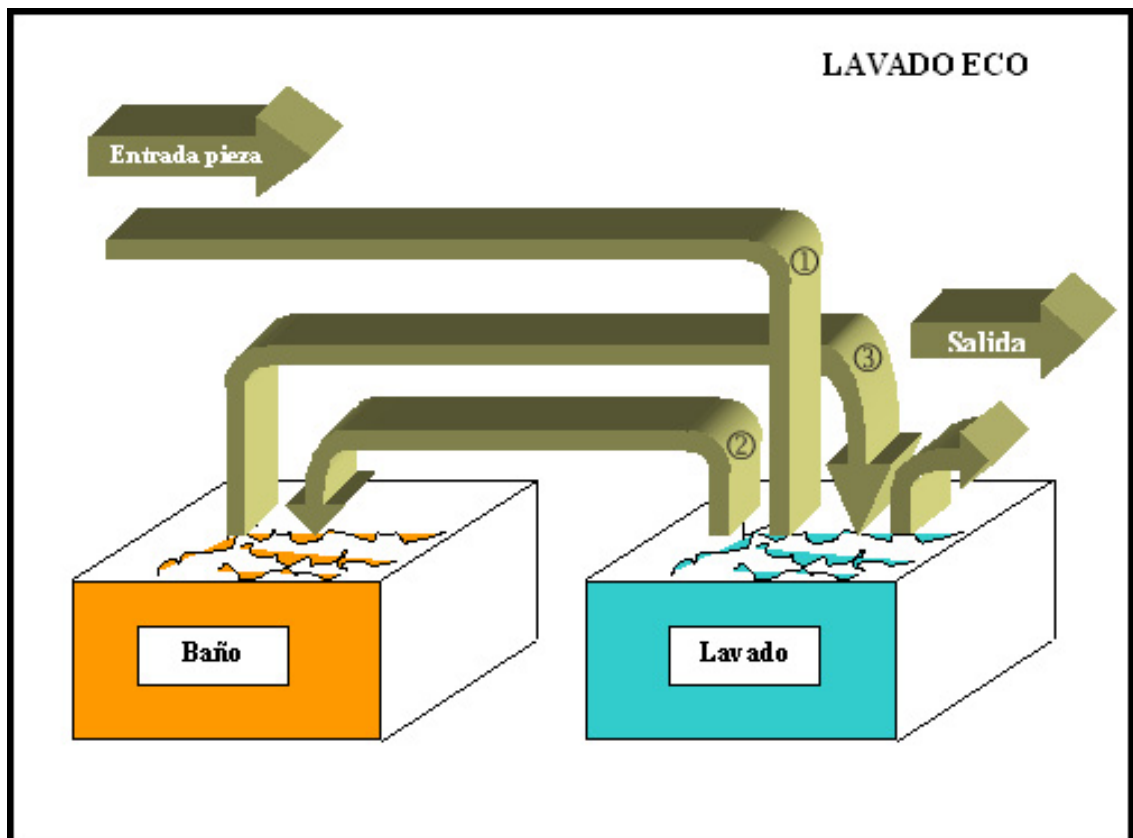
2.3.5 Lavados estancos de recuperación

Se trata de un prelavado que sirve para retener una parte de los arrastres procedentes del baño de tratamiento y, por lo tanto, ayuda a economizar materias primas.

Como su nombre indica, no está alimentado por ningún caudal de agua continua, sino que periódicamente es renovado en su totalidad. Además de la función anterior, el uso de los enjuagues de recuperación permite reducir la contaminación del líquido arrastrado por las piezas y, por lo tanto, reduce las necesidades de agua de lavados posteriores.

Cabe la posibilidad de que estos lavados de recuperación estén situados a continuación de una solución de proceso que trabaja en caliente. En este caso, pueden utilizarse para reponer las pérdidas que, por evaporación, sufrirá el baño anterior.

Para algunos baños que trabajan a temperatura ambiente se puede realizar, en la misma cubeta de recuperación, un enjuague previo y uno posterior, de modo que el arrastre de entrada al baño de proceso proceda del propio sistema de recuperación. El resultado es una recuperación parcial sobre un proceso en el que no existe evaporación. Este tipo de enjuague recibe el nombre de ECO.



2.4 Acondicionamiento de aguas

2.4.1 Tratamiento previo al proceso

En recubrimientos de superficie, la calidad de la fabricación depende de la calidad del agua de entrada. En muchas ocasiones, el agua de entrada no es apta para ser utilizada directamente en los baños de proceso e, incluso, puede comportar tantas impurezas que ofrezca problemas en etapas de lavado –especialmente, si son finales- y que acabe saturando con rapidez equipos de recuperación de este elemento.

Es preciso, como norma general, proceder a su análisis químico inicial para determinar la presencia, entre otras, de hierro, calcio, magnesio, manganeso y cloruros, ya que pueden dar problemas en el proceso de electrodeposición. Además, hay que tener en cuenta la posible estacionalidad en cuanto a la calidad del agua (por ejemplo, es común en muchos lugares un aumento de la concentración salina durante la época estival). A pesar de todo, es difícil fijar unos valores óptimos, ya que la calidad del agua está en función de las condiciones particulares de su utilización. De todos modos, se acepta que un agua con un TH³ de 15-20 °F y un TAC⁴ de 10-15 °F resulta adecuada para la preparación de la mayoría de baños de proceso y para sus lavados.

Lo que está claro es que utilizar agua de entrada contaminada acorta la vida de los baños y su eficacia, dificulta la recuperación del agua de lavado, origina rechazo de piezas y contribuye a la carga contaminante a depurar.

Como recomendaciones generales, en lo que respecta a la calidad química del agua de entrada, el industrial galvánico deberá tener en cuenta las siguientes:

- Baños alcalinos y sus lavados: en general, es mejor el agua blanda para evitar deposiciones y manchas.
- Baños calientes: el agua más recomendable es la desmineralizada (o la descarbonatada) para evitar la mineralización del baño por una concentración progresiva en sales.
- Lavados finales: es preciso controlar rigurosamente su calidad, para evitar la formación de manchas (presencia de sales) y la posterior corrosión de la superficie acabada (presencia de cloruros)

³ Título hidrotimétrico es la totalidad de sales de Ca y de Mg inestables (bicarbonatos) y estables (carbonatos, cloruros, sulfatos, etc.).

⁴ Título alcalimétrico completo es la concentración en Ca y Mg ligada a los bicarbonatos.

Entre los elementos utilizados para la modificación del agua de entrada, podemos destacar los siguientes:

- descalcificadores,
- desmineralizadores con intercambiador iónico,
- ósmosis inversa.

2.4.2 Tratamiento posterior al proceso: depuración fisicoquímica

Como recomendación general, antes de decidirse por uno u otro sistema de tratamiento, el industrial deberá tener en cuenta los aspectos siguientes:

1. Realizar un estudio exhaustivo de todas las aguas residuales generadas en los distintos puntos de la línea galvánica.
2. Adoptar todas aquellas medidas de reducción en origen adecuadas a su problemática, incluyendo modificaciones en equipos, procesos y prácticas actuales.
3. Analizar y, finalmente, implementar medios destinados a recuperar las corrientes residuales.
4. Finalmente, decidir los sistemas de tratamiento más adecuados, teniendo en cuenta la consecución de un nivel de descontaminación satisfactorio, minimizándose la cantidad y toxicidad de los residuos generados en el proceso de tratamiento.

Tal y como hemos visto anteriormente, los procedimientos convencionales de tratamiento de aguas residuales en el sector de los recubrimientos de superficie pasan por la eliminación de los metales a través de la formación y precipitación de hidróxidos metálicos relativamente insolubles. Los únicos requisitos químicos para este proceso es que los metales se encuentren libres en el efluente y que el pH sea el adecuado para asegurar una óptima precipitación con hidróxidos.

El requisito de que los metales se encuentren en forma libre es realmente difícil de conseguir en aguas cargadas de cianuros, EDTA, NTA, abrillantadores, humectantes, etc., cuando, precisamente, los compuestos complexantes se introducen en determinados baños de proceso para regular la cantidad de metal libre -en forma iónica- en el electrolito. Un ejemplo muy representativo lo encontramos en el caso de los baños cianurados de cobre. La experiencia demuestra que buena parte de las plantas de tratamiento de aguas residuales no tienen en cuenta todos estos preceptos.

Es aconsejable y, de hecho, ya se realiza en algunos países de la cuenca mediterránea, que las aguas residuales generadas en los talleres de tratamiento de superficies sean agrupadas en distintas corrientes

(según sus características químicas) y tratadas por separado; y así se siga el mismo criterio para las descargas de los concentrados agotados que se produzcan de forma periódica.

Es preferible que las plantas de tratamiento estén bajo el nivel de los desguaces, ya que de este modo los efluentes llegan por acción de la gravedad hasta los reactores de tratamiento, donde se lleva a cabo su depuración y, una vez han perdido su agresividad química, pueden ser bombeados hasta su punto de destino.

La depuración se efectúa químicamente y la dosificación de los reactivos se controla de manera automática. Éste es el método más común, aunque no permite ningún tipo de recuperación de los materiales valiosos perdidos.

Para la perfecta comprensión del funcionamiento de una planta depuradora resulta necesario comentar los distintos mecanismos de las reacciones químicas que tienen lugar en las operaciones de depuración.

Todas las formas de tratamiento pueden agruparse en operaciones de destrucción o transformación de los componentes de las aguas residuales, o bien de la separación de éstas.

Para los efluentes procedentes de las industrias de acabados de superficies, los componentes más importantes son de tipo inorgánico, tales como metales pesados o aniones como cianuros o cromados. Hay, en muchos casos, presencia de aceites y grasas que, en ocasiones, es necesario separar. En cambio, la contaminación de tipo bacteriológico no es un problema en este sector industrial y, por lo tanto, no será considerada.

** Tratamiento de cianuros*

El cianuro es un componente muy común en las corrientes residuales producidas por las industrias de tratamiento de superficies ya que, como hemos visto, se utilizan muchos baños de deposición electrolítica de metales con contenidos elevados de cianuro potásico o sódico. También se encuentran en las aguas de las instalaciones de temple de hierro o acero, ya que se utilizan sales cianuradas fundidas o muy concentradas. Las concentraciones de cianuro libre que podemos hallar en estos efluentes oscilan entre 20 y 100 mg/l y pueden ser, en algunos casos, superiores.

Es necesario efectuar una distinción entre los cianuros simples, como el sódico o el potásico, y los cianuros complejos de metales pesados, como el cobre, níquel, cinc y otros. Los efluentes residuales de galvanotecnia contienen cianuros de ambos tipos, y aunque las toxicidades son diferentes y dependen de la especie química, es imprescindible depurarlos.

El proceso habitual consiste en la oxidación del ion cianuro mediante un agente oxidante. El más común es el hipoclorito sódico, aunque también se utiliza el cloro gaseoso.

Los cianuros simples son oxidados con facilidad por estos agentes oxidantes. En cambio, los complejos metálicos presentan distintas reactividades según el metal que contengan. Los complejos de cinc o cadmio se oxidan bastante rápidamente. En cambio, los complejos de plata o níquel reaccionan muy lentamente. El complejo de cobre se sitúa entre ambos. El tiempo de reacción dependerá, pues, de los metales presentes en los efluentes. Si no fuera así, correríamos el riesgo de que la reacción fuese incompleta. Igualmente, si las condiciones de reacción no son totalmente adecuadas, se puede producir la generación de cianuros metálicos insolubles. Éstos pueden decantar y escapar así de la depuración.

Los complejos cianurados de níquel precisan para su destrucción unos tiempos de reacción extremadamente prolongados, del orden de 10 a 20 horas (de imposible consecución en la práctica). Dado que estos cianuros no se forman más que cuando se mezclan aguas cianuradas y aguas con contenido de níquel, es muy importante mantener separados estos dos tipos de efluentes.

La destrucción del cianuro se efectúa por oxidación, transformándose en cianato (CNO⁻). Los cianatos, en presencia de un exceso de oxidante, son oxidados a dióxido de carbono y nitrógeno. Normalmente se considera que el cianato no presenta demasiada toxicidad, ya que es del orden de mil veces más pequeña que la del ion cianuro. El cianato se puede hidrolizar en medio ácido formando amonio y carbonato. El amonio es más tóxico que el propio cianato y, por lo tanto, esta posibilidad se ha de evitar.

Si la oxidación se realiza con hipoclorito hay que asegurarse de que las condiciones (pH, exceso de reactivos, etc.) sean las adecuadas para impedir la liberación al entorno de cloruro de cianógeno, gas volátil y tan tóxico como el ácido cianhídrico.

La depuración de los cianuros complejos de metales pesados se produce a velocidades variables y, también, en varias etapas. Así, por ejemplo, en el caso del cianuro complejo de cobre y potasio ($K_3Cu(CN)_4$), tres grupos cianuro se destruyen con relativa rapidez, mientras que el cuarto es muy resistente. Los cianuros complejos de hierro, prácticamente no son atacados por el hipoclorito y, por lo tanto, se ha de emplear algún otro procedimiento como, por ejemplo, por precipitación añadiendo una sal de hierro(II) en forma de “azul de Prusia” (hexacianoferrato(III) de hierro(II)). No obstante, la toxicidad de estos complejos de hexacianoferrato es pequeña, por ejemplo, 200 mg/l de complejo correspondiente a 0,1 mg/l de cianuro.

** Tratamiento del ácido crómico*

El ácido crómico es uno de los compuestos más tóxicos y peligrosos de las aguas residuales. Además, su coste relativo es elevado en comparación con el de otros productos utilizados en galvanotecnia y, por lo tanto, existe un interés especial por su recuperación.

El proceso de depuración más utilizado actualmente consiste en la reducción, en un medio ácido, del cromo hexavalente a cromo trivalente, el cual se puede hacer precipitar en forma de hidróxido en la etapa de neutralización.

Para la reducción de un kilogramo de ácido crómico, teóricamente son necesarios 156 kg de bisulfito sódico y 74 kg de ácido sulfúrico. En realidad, el consumo de reactivos es muy superior y puede llegar hasta el 300 % del consumo teórico.

La precipitación del cromo trivalente se lleva a cabo, normalmente, después de reunir todas las aguas residuales con contenido de metales pesados. Entonces, se le añade un alcalino, como sosa o leche de cal y se produce la precipitación de los hidróxidos metálicos. La precipitación del hidróxido de cromo se realiza a un pH comprendido entre 7,8 y 8,5. A pH superiores existe peligro de redisolución por formación de cromitos, siempre en los casos que se neutralice mediante la sosa. Este riesgo es considerablemente inferior en el caso de neutralización mediante la leche de cal.

** Precipitación y separación de hidróxidos metálicos*

La separación de los metales tóxicos en disolución por precipitación en forma de hidróxidos es una técnica ampliamente desarrollada en depuración. Este proceso tiene lugar simultáneamente con el neutralizado del efluente, ya que el margen de valores admitidos por el pH de vertido es adecuado para asegurar la precipitación de la mayoría de los metales comunes.

El planteamiento de esta fase del tratamiento requiere un análisis previo bastante profundo, que tenga en cuenta conceptos tales como la solubilidad del metal según el reactivo, el pH, la temperatura, la utilización de agentes coagulantes y floculantes, la precipitación de especies quelantes, el alcalino a utilizar para la precipitación, etc.

2.5 Corrientes residuales

2.5.1 Introducción

En el sector de baños galvánicos se originan unas corrientes residuales que provienen, en esencia, de las pérdidas de materias primas derivadas de su actividad. Parte de estas pérdidas de materias son voluntarias; este es el caso, por ejemplo, del vaciado de un baño de desengrase que deja de actuar por su contaminación en aceites; su reemplazo por un nuevo baño origina una solución residual, es decir, una corriente residual. Pero también tenemos pérdidas de materias de forma involuntaria, como es el caso de las pérdidas por arrastre (aquella capa fina de líquido que, al extraer las piezas de un baño las moja y sale del mismo con ellas). En este caso, la necesidad de lavar las piezas para limpiar el arrastre genera una agua residual contaminada por la propia materia que hemos perdido.

Veamos, a continuación, cuáles son las corrientes residuales más significativas del sector.

2.5.2 Corrientes residuales generadas

De un modo genérico, encontramos las corrientes residuales, para las diversas actividades relacionadas con los procesos de baños galvánicos, que detallamos a continuación:

a) Almacenamiento de materias primas:

- residuos generados por materias deterioradas en el almacén,
- pérdidas de productos químicos durante las operaciones de manipulación y trasvases por vertido, fugas de productos por rotura de bidones o bien por pérdidas en los grifos,
- pérdidas de producto retenido en las paredes de los envases y bidones en operaciones de vaciado de envases,
- los propios envases y bidones vacíos con restos de producto.

b) Operaciones de proceso:

- partículas y polvo procedentes de operaciones de pretratamiento mecánico,
- emisión de disolventes en operaciones de desengrase,
- baños de desengrase sucios de aceites, grasas, pastas de pulir, etc.,
- baños de decapado contaminados por el metal de base de las piezas tratadas,
- baños usados inactivos pero que aún contienen productos de aportación, bisulfito, anodizado, fosfatación, cromado, etc.,
- aguas residuales contaminadas por el arrastre de líquido al salir las piezas de los distintos baños de proceso,
- emisiones difusas procedentes de baños que trabajan a cierta temperatura (>50°C),

- emisión de gases de combustión por el calentamiento de baños o el secado de piezas,
- goteo al suelo de líquido de baños, entre cubas de proceso o al cruzar un corredor en instalaciones manuales.

c) Actividades auxiliares:

- material absorbente sucio y fangos procedentes del mantenimiento de baños,
- soluciones concentradas procedentes de la regeneración de equipos de resinas de intercambio iónico o de ósmosis inversa,
- soluciones concentradas y material sucio de la depuración de baños,
- soluciones concentradas de la depuración de emisiones en la atmósfera,
- fangos con hidróxidos metálicos de depuración de aguas residuales,
- soluciones concentradas procedentes del desmetalizado de bastidores,
- fangos, etc., de la limpieza de conducciones, bombas, etc.,
- material filtrante para el tratamiento de aguas agotado o sucio, resinas, filtros, etc.

Si englobamos y clasificamos todas estas corrientes residuales, según los vectores de contaminación convencionalmente aceptados, tenemos lo siguiente:

Aguas residuales

- Efluentes de regeneración de resinas u ósmosis
- Efluentes diluidos de lavado de piezas
- Soluciones de baños concentradas agotadas o contaminadas
- Soluciones contaminadas de equipos de lavado de humos.

Residuos industriales

- Baños de preparación de superficies agotados: desengrasados y decapados
- Baños de proceso contaminados o agotados: anodizados, neutralizaciones con bisulfito, baños de cromato contaminados con metales pesados y cromo trivalente
- Soluciones desmetalizadoras
- Soluciones y filtros de tratamiento de emisiones en la atmósfera
- Bidones y envases vacíos
- Fango procedente de depuración de efluentes
- Material filtrante y absorbente diverso: filtros, carbón activo, absorbentes, trapos sucios, etc.
- Material usado en el tratamiento del agua: resinas de intercambio iónico agotadas, filtros de ósmosis inversa, etc.

Emisiones en la atmósfera

- Emisión de polvo y partículas procedentes de las operaciones de pretratamiento mecánico (granallado, pulido, etc.).
- Emisiones difusas procedentes de los baños (pretratamientos y proceso), básicamente constituidas por vapor de agua procedentes de soluciones que trabajan a cierta temperatura (>50 °C)
- Emisiones de compuestos orgánicos volátiles de los baños de pretratamiento de piezas.
- Vapores con ácido crómico procedentes del cromado de piezas
- Gases contaminantes procedentes de calderas de combustión utilizadas para calentar baños o secar piezas.

La siguiente tabla suministra información sobre la importancia relativa de los tres vectores analizados, en función de su problemática ambiental y, por consiguiente, el esfuerzo que el industrial debe dedicar:

Corrientes residuales	Importancia Relativa (%)
Aguas residuales industriales	50
Residuos industriales	40
Emisiones en la atmósfera	10

Tabla 3: fuente: autor

2.5.3 Resumen de las corrientes residuales generadas

DESCRIPCIÓN DE LA CORRIENTE RESIDUAL	ORIGEN	DESCRIPCIÓN
VECTOR: Aguas		
Efluentes diluidos	Lavado de piezas	Líquidos y baños de tratamiento y revestimiento de metales (galvanización, anodizado, fosfatación, decapado).
Soluciones concentradas de proceso (en el supuesto de que sean tratadas por la propia empresa)	Baños de proceso agotados o contaminados	Líquidos y baños de tratamiento y revestimiento de metales (galvanización, anodizado, fosfatación, decapado).
Eluidos de regeneración	Soluciones concentradas de la regeneración de resinas de intercambio iónico y de ósmosis inversa	Eluidos de regeneración de resinas de intercambio iónico.
Soluciones concentradas de emisiones en la atmósfera	Aguas contaminadas de sistemas de depuración de gases y vapores	Líquidos y baños no cianurados crómicos. Líquidos y baños no cianurados no crómicos.
VECTOR: Residuos		
Disolventes halogenados sucios	Disolventes halogenados (tricloroetano, percloroetano, etc.) sucios con aceites, grasas, etc.	Disolventes, mezclas brutas con disolventes y líquidos orgánicos halogenados.
Soluciones concentradas de pretratamientos (en el supuesto de que sean gestionadas externamente)	Baños de preparación agotados o contaminados (desengrasados alcalinos y decapados ácidos) con aceites y metales	Líquidos y baños no cianurados no crómicos. Soluciones ácidas decapantes, de pasivación, desengrasantes sin ácido crómico. Soluciones alcalinas decapantes, de pasivación, desengrasantes. Otras soluciones decapantes, de pasivación, desengrasantes.
Soluciones concentradas de proceso	Baños galvánicos agotados o contaminados (anodizado, fosfatación, cromado, bisulfito, etc.).	Líquidos y baños no cianurados crómicos. Líquidos y baños no cianurados no crómicos. Soluciones ácidas decapantes, de pasivación.
Soluciones alcalinas con tensoactivos	Soluciones alcalinas con tensoactivos sucias con grasas, aceites, etc. (desengrase químico)	Soluciones alcalinas decapantes, de pasivación, desengrasantes.
Soluciones concentradas en mantenimiento de instalaciones	Soluciones empleadas para el desmetalizado de bastidores	Líquidos y baños no cianurados crómicos Líquidos y baños no cianurados no crómicos Otras soluciones decapantes, de pasivación, desengrasantes.
Material absorbente en el tratamiento de emisiones en la atmósfera	Material de filtrado de COV's Material de filtrado de emisiones en la atmósfera con metales pesados	Adsorbentes, materiales de filtración, trapos de limpieza y ropa protectora contaminados con metales pesados.
Bidones y envases vacíos	Bidones de plástico y envases metálicos que han contenido	Envases y embalajes de plástico. Envases y embalajes metálicos.

DESCRIPCIÓN DE LA CORRIENTE RESIDUAL	ORIGEN	DESCRIPCIÓN
	materiales	
Fangos procedentes del tratamiento de efluentes	Fangos procedentes del tratamiento fisicoquímico de las aguas residuales	Fangos de tratamiento de efluentes (pretratamientos y depuradoras).
Fangos de tratamiento de efluentes	Procedentes de la sedimentación, decantación, filtración, prensado	Fangos de tratamiento de efluentes (generados en la depuración de las aguas residuales producidas antes de cualquier tratamiento químico posterior y convenientemente separadas y tratadas).
Material filtrante usado en tratamiento de agua	Carbón activo y resinas de intercambio iónico agotados	Resinas de intercambio iónico. Carbón activo.
Material filtrante y absorbente diverso	Material del filtrado y mantenimiento de baños: filtros, trapos, etc.	Residuos inorgánicos que contienen metales no especificados anteriormente. Adsorbentes, materiales de filtración, trapos de limpieza y ropa protectora contaminados con metales pesados.
Partículas de pretratamientos mecánicos. Arenas	Granallado, pulido mecánico, etc.	Granalla, limaduras, chatarra y partículas metálicas..
VECTOR: Emisiones en la atmósfera		
Vapores de agua de proceso	Vapores de cubas que trabajan a cierta temperatura (>45-50 °C)	
Vapores con ácido crómico	Vapores que contienen gotas de ácido crómico procedente del cromato	
Gases contaminantes de fuentes de combustión	Gases que provienen de la combustión en el calentamiento de baños o secado de piezas	

Tabla 4

A continuación, comentamos con cierto detalle las diversas corrientes residuales descritas para los diferentes procesos productivos.

Pretratamiento mecánico

Las operaciones de granallado, pulido mecánico y similares originan, fundamentalmente, una emisión en la atmósfera de polvo y partículas metálicas que, casi siempre, se recogen mediante sistemas de filtrado, obteniéndose un residuo industrial. Por otra parte, el propio material abrasivo utilizado, una vez desgastado por su fricción con las piezas metálicas, acaba convertido en otro residuo industrial que se tiene que gestionar.

Desengrase de piezas

En función del tipo de desengrase empleado, la corriente residual que se genere será de un tipo u otro. Básicamente, por su grado de implantación, distinguimos dos tipos de desengrase mayoritario: desengrase mediante disolventes halogenados (TRI, PER, etc.) y desengrase acuoso en medio alcalino.

En el caso de utilización de disolventes halogenados, estos se van contaminando con los aceites, grasas, pastas de pulir, etc. que llevan las piezas al entrar antes del proceso galvanizado. Estos disolventes sucios, en caso de que no se recuperen vía destilación, acaban convertidos en un residuo altamente contaminante que se genera con cierta periodicidad. Asimismo, el uso de estos disolventes genera una emisión en la atmósfera de compuestos orgánicos volátiles (COV's).

Para los desengrasados acuosos en medio básico, aparte de la contaminación de aceites y grasas mencionada, los compuestos contaminantes más habituales son las sales sódicas (hidróxidos, carbonatos, fosfatos y metasilicatos), además de tensoactivos o complexantes (EDTA, NTA, etc.) de naturaleza orgánica. Antiguamente -y ahora aún se podría encontrar algún caso- también se añadía cianuro sódico al baño para reforzar el poder desengrasante; actualmente, gracias a las mejoras tecnológicas en la formulación de estos baños, esta práctica está prácticamente extinguida. Se trata de un residuo que se genera con mayor periodicidad que los disolventes halogenados pero, en contrapartida, el industrial lo puede depurar con su planta depuradora (si la instalación lo permite), ya que su gestión es un proceso mucho más económico. En el caso de que el baño sea en caliente, tendremos también una emisión difusa de vapor de agua. Existen distintos sistemas para cuantificar estas pérdidas difusas de agua por evaporación; en este caso, proponemos utilizar la siguiente tabla donde, en función de la temperatura de la solución de trabajo y de su densidad, tenemos unos valores de evaporación por metro cuadrado de cuba y hora. Para los datos que no coincidan, se puede efectuar una extrapolación.

Densidad de la solución	Ejemplo de solución	Temperatura (°C)	Valor de evaporación (l.m ² /h)
1	Agua	50	1
		70	9
		90	23
1,2	Baño de níquel	50	0,8
		70	7
		90	20
1,4	Baño de cromo duro	50	0
		70	2
		90	5

Tabla 5

En caso de existir un sistema de aspiración de gases o de agitación por aire de la solución, estos valores de evaporación deben incrementarse en un 50%.

Decapado

La gran mayoría de decapados suelen ser diluciones -más o menos concentradas, aunque predomina el 30%- de un ácido en agua: ácidos clorhídrico y sulfúrico, como principales, y ácidos nítrico, fosfórico o fluorhídrico como secundarios.

El residuo se genera -por cargas- cuando, al atacar el metal base que se está decapando, parte de este metal se disuelve en el ácido y acaba por contaminarlo, de tal modo que éste pierde su función decapante. En este momento, se genera el residuo que, por sus características, puede ser tratado por el propio industrial en plantas depuradoras de tipo fisicoquímico. Su generación es más esporádica que la que corresponde a los desengrasados acuosos alcalinos.

Procesos galvánicos

Los contaminantes generados dependerán del tipo de proceso, de su composición y concentración, etc. Básicamente, los contaminantes en los procesos galvánicos se pueden clasificar en:

- emisiones difusas de vapor de agua en la atmósfera y partículas de cromo en los baños de cromado, para soluciones que trabajan a más de 50°C;
- emisiones de gases de combustión procedentes de calderas utilizadas para calentar baños de proceso y/o secar piezas;

- baños de tipo ácido: niquelado, zincado ácido, cobre ácido estañado, anodizado de aluminio, fosfatación de hierro, pasivación blanco, entre otros;
- baños de tipo alcalino: zincado alcalino exento de cianuros, cobre alcalino exento de cianuros, pavonado, como principales;
- baños de tipo alcalino cianurado: zincado cianurado, cobre cianurado dorado, plateado, etc.;
- baños de tipo ácido crómico: cromado y pasivación amarillos, como más extendidos.

En función de la composición del baño, encontraremos el metal pesado correspondiente al baño (Ni, Cu, Zn, Fe, Al, Sn, Au, Ag, etc.), con los aniones que lo acompañan en su forma de sal (Cl⁻, SO₂+4, PO₃+4, CO₃+2; OH⁻, etc.). En el caso de baños cianurados, además del metal correspondiente y las diversas sales, encontraremos la forma CN⁻, en sus diversas expresiones de equilibrio dinámico. En cuanto a la mayoría de baños de cromato, encontraremos Cr⁶⁺.

Esta forma química de clasificar las corrientes residuales generadas en el proceso galvánico, tiene su correspondencia física, consistente en las corrientes siguientes:

- diluidos
- concentrados

Si bien los diluidos hacen referencia básicamente a las aguas de enjuague entre procesos de tratamiento, los concentrados corresponden al propio baño o a algún enjuague estanco concentrado que la empresa precise renovar.

Los diluidos suelen generarse en continuo, a lo largo de la actividad de recubrimiento, mientras se van lavando las piezas entre los diversos baños de proceso, mientras que los concentrados se producen por cargas, al llegar al final de la vida útil del baño o máxima concentración admisible de un enjuague estanco.

Almacenamiento de materias primas

Tal y como se ha descrito, buena parte de las corrientes residuales que se generan en esta área de la empresa tiene lugar por unas condiciones de almacenamiento y/o de operación no demasiado adecuadas; es decir, en la mayoría de casos, por prácticas ambientales poco aconsejables. Entre ellas, podemos destacar la mala gestión de las existencias del almacén, unos sistemas deficientes de almacenamiento y/o trasvase de materiales, una baja formación e información del personal encargado del almacén, etc. De este modo, se generan productos caducados, vertidos accidentales que no se recogen debidamente, pérdidas en los trasvases, envases vacíos mal enjuagados con

restos de producto en su interior, etc. Todo ello acaba convirtiéndose en una corriente residual que hay que gestionar adecuadamente.

Actividades auxiliares

Dentro de las operaciones auxiliares, podemos destacar las siguientes como más significativas, por lo que respecta a la generación de corrientes residuales:

- depuración de aguas residuales: origina una cantidad de fangos, en forma de hidróxidos metálicos que, según los casos, puede resultar muy importante (es el supuesto de la anodizado de aluminio). Dentro de este tratamiento propio, la empresa habitualmente gestiona buena parte de las corrientes residuales -en forma líquida- que ha generado en el proceso galvánico; es decir, aguas de enjuague diluidas y soluciones o baños agotados concentrados. También se encuentran, según el tipo de baños de los que disponga la empresa, cianatos e hidróxidos de cromo.
- operaciones de limpieza y mantenimiento de baños: en este caso, se obtiene tanto un material filtrante sucio como el propio material filtrado, en forma de fango, sedimento o material adsorbente, contaminado;
- desmetalizado de bastidores: operación muy contaminante, dado que suele utilizar soluciones con productos complexantes, cianurados o ácidos de difícil tratamiento posterior -caso, por ejemplo, del ácido nítrico-; además, la situación se complica ya que presenta una fuerte concentración del metal que se ha extraído del bastidor.
- otro material procedente de equipos de tratamiento de aguas -resinas de intercambio iónico, ósmosis inversa, etc.- genera, muy ocasionalmente, residuos sólidos que requieren un tratamiento posterior: resinas agotadas, carbón activo contaminado, material filtrante como es el caso de membranas, etc.

Finalmente, en las páginas siguientes se adjuntan unos esquemas que resumen la información facilitada en este capítulo.

DIAGRAMA DE FLUJO. ALMACÉN DE MATERIALES

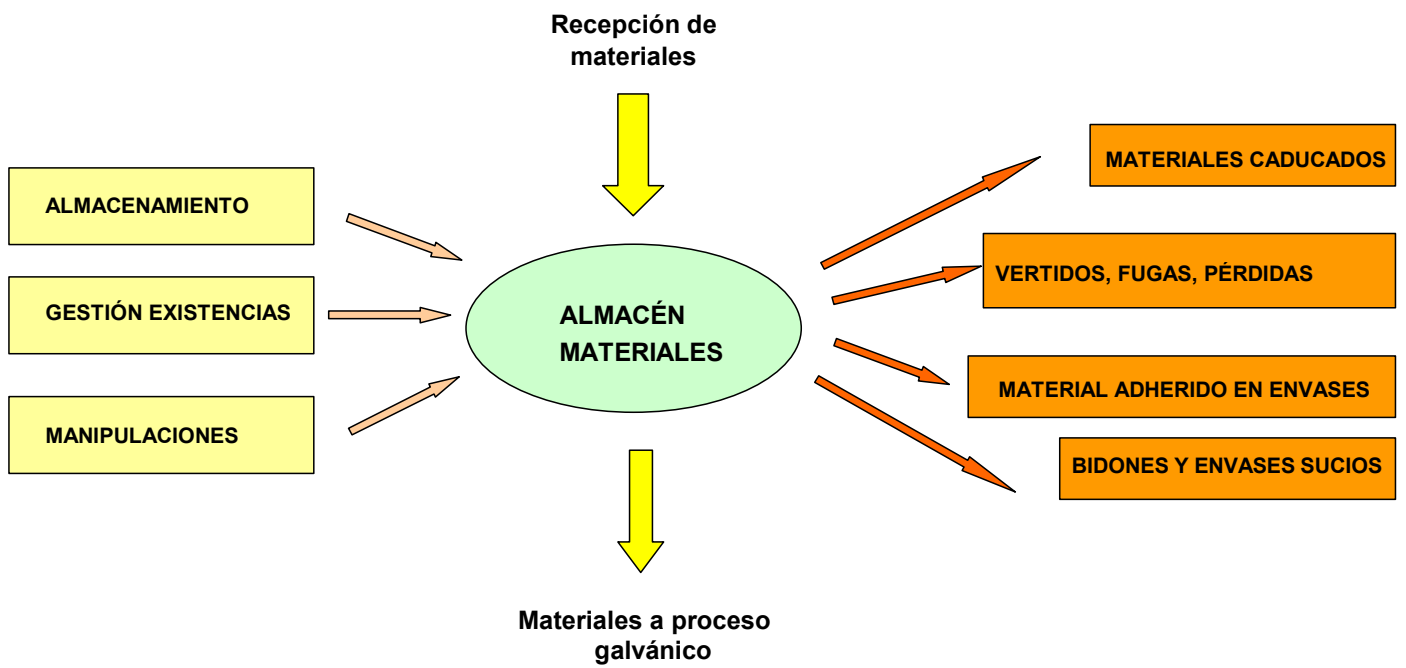


DIAGRAMA DE FLUJO. PROCESO GALVÁNICO

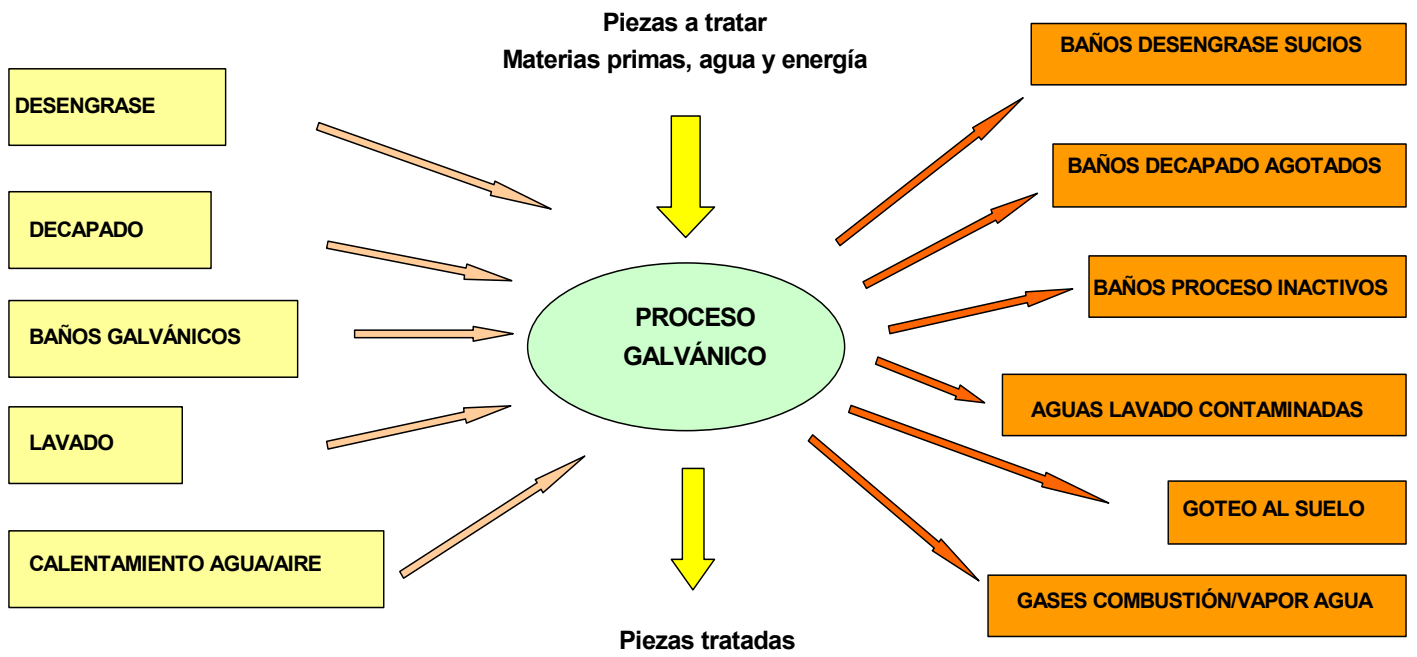
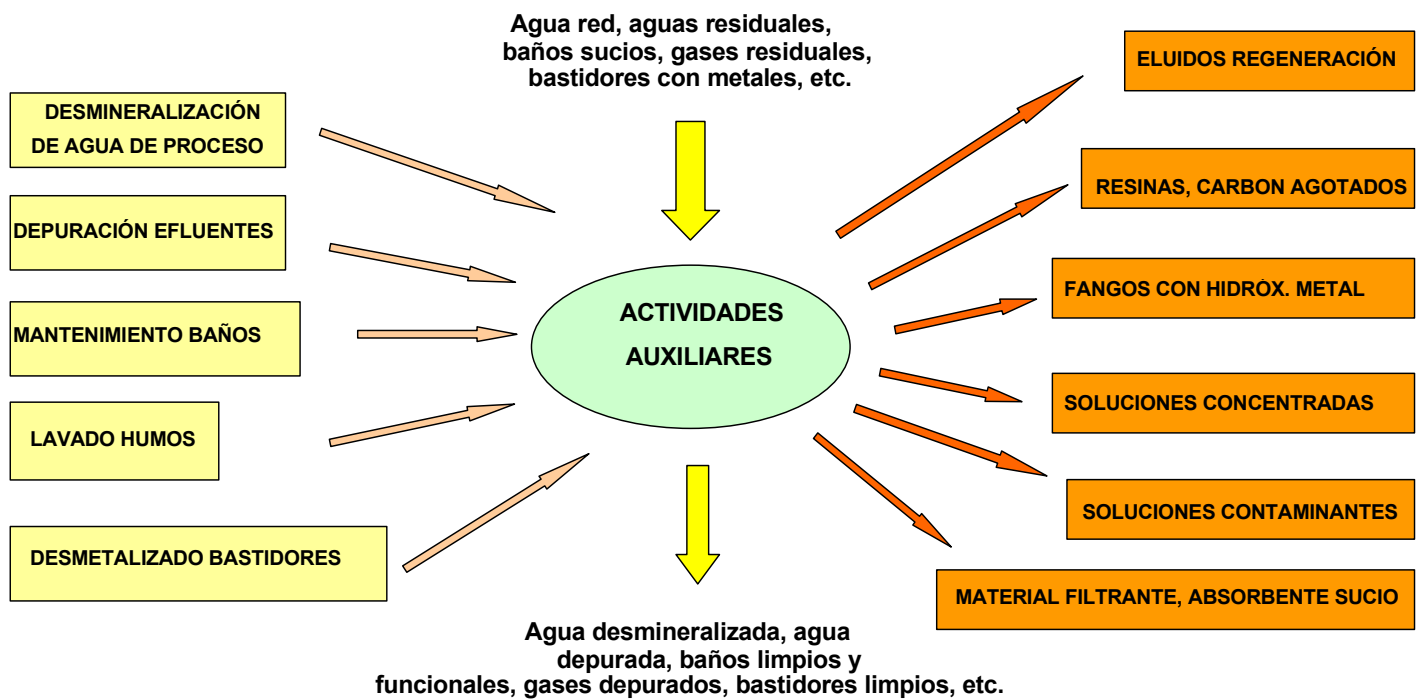


DIAGRAMA DE FLUJO. ACTIVIDADES AUXILIARES



3. LAS ALTERNATIVAS DE PREVENCIÓN DE LA CONTAMINACIÓN

La *prevención en origen* de la contaminación significa, ante todo, evitar su generación. Aparte de las mejoras ambientales que se consiguen, la implementación de una política de prevención de la contaminación repercute en una disminución del coste de la gestión ambiental, en el diseño de las instalaciones de tratamiento de las corrientes residuales con un correcto dimensionamiento, en la mejora de la imagen y en la aportación de un nivel de protección superior de la personas y del medio ambiente.

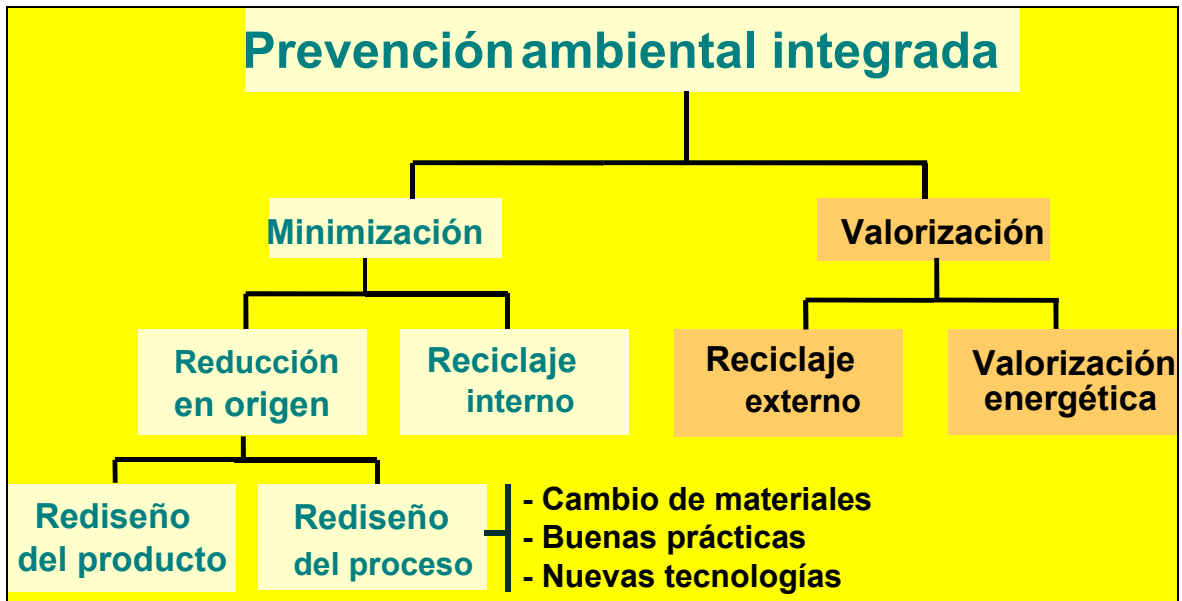
La *minimización* de residuos, aguas residuales y emisiones contaminantes a la atmósfera es un concepto equivalente al de prevención en origen de la contaminación y puede definirse como la combinación de reducción y reciclaje en origen.

La *reducción en origen* consiste en evitar o en disminuir las corrientes residuales (o su grado de peligrosidad para el entorno) antes de que se hayan generado por medio de modificaciones en el proceso de fabricación, de la aplicación de buenas prácticas, del cambio de materiales y/o de producto o de la utilización de tecnologías más respetuosas con el medio ambiente.

Una vez se han aplicado las formas viables de reducción en origen se considera, como segunda opción, el *reciclaje en origen*, es decir, la reutilización de la corriente residual que inevitablemente se haya producido en el mismo proceso o en el mismo establecimiento que lo haya generado.

Una política medioambiental correcta solamente tomará en consideración los tratamientos en final de línea y/o la gestión de la corriente residual cuando se hayan analizado y/o aplicado las opciones de minimización viables para la empresa.

La figura siguiente esquematiza el concepto de minimización o prevención en origen:



El estudio y el conocimiento del sector galvánico ponen de manifiesto una serie de factores que provocan un mal funcionamiento de las empresas en cuestión y una gestión medioambiental pobre.

El objeto principal de este tercer punto es ofrecer una serie de alternativas a las prácticas actuales. Estas alternativas están encaminadas a una reducción en origen de las corrientes residuales y a una gestión eficaz de los residuos que, inexorablemente, se generan. La reducción de los arrastres, la sustitución de materias primas por otras potencialmente menos contaminantes, la reutilización de las aguas, el tratamiento de éstas y las buenas prácticas profesionales de los operarios serán, en los siguientes apartados, objeto de nuestro estudio.

3.1 Reducción en origen de la contaminación

3.1.1. Cambio de materiales. Substitución de materias primas

La sustitución de materias primas es una de las alternativas empleadas con el fin de reducir la generación de corrientes residuales. En muchos casos se están utilizando materias primas altamente contaminantes en los procesos de preparación de la pieza o en los baños de proceso. No obstante, existen alternativas a estas materias, empleadas ya con buenos resultados, basadas en productos químicos que no atacan al medio ambiente de la manera que lo hacen los que hasta ahora han sido tradicionales y que, al mismo tiempo, realizan la misma función o proporcionan los mismos resultados que éstos. Veamos, para cada baño, la alternativa disponible.

- Desengrase

La utilización de distintos disolventes clorados, como es el caso del tricloroetano, tricloroetileno, percloroetileno, etc., tiende a desaparecer progresivamente, debido a los impactos que ejercen estos compuestos sobre la salud de las personas y sobre el medio ambiente.

Este hecho ha provocado la aparición de distintos productos alternativos, por parte de algunas casas comerciales dedicadas al abastecimiento de materias primas.

Lo cierto es que, en determinados casos, el mismo sustituto del disolvente clorado mejora su actividad, siendo más efectivo en la tarea de desengrase.

Entre toda la gama de productos alternativos hay que citar en primer lugar **las mezclas a base de p-cimeno**, ya que son productos perfectamente efectivos en el desengrase, a la vez que están formados por productos tensoactivos totalmente biodegradables. Se trata de un terpeno monocíclico (1,8 (9) P-Mentadieno) que tiene unas características que lo hacen apto para numerosas aplicaciones: producción de aromas y perfumes, formulación de disolventes y detergentes, sustituto en algunos casos de los clorofluorocarbonatos, sustituto también del 1,1,1 tricloroetano, tricloroetileno y percloroetileno, detergentes desengrasantes para aceros y metales en general, etc. Como características principales podemos citar: no es tóxico, es totalmente biodegradable, no altera la capa de ozono y no perjudica la atmósfera, entre otras. Dado que se utiliza en vía húmeda, en según qué aplicaciones es recomendable realizar previamente una prueba piloto para comprobar que la calidad del producto final no queda afectada.

La dificultad que plantea este sustituto es que para su utilización es imprescindible un equipo automático de riego del producto por aspersión y de movimiento de las piezas a desengrasar, para favorecer el efecto mecánico del desengrase.

Recientemente, existe la posibilidad de utilización de **hidrofluoroéteres** (HFEs) con buenas características desengrasantes; además, la pieza sale seca. Estos productos tienen como principales características: baja toxicidad, estabilidad térmica y química, baja viscosidad y tensión superficial, son excelentes humectantes, presentan buena penetración, baja solubilidad en agua, no son inflamables y carecen de punto de ignición. El producto, al igual que sucede con los disolventes clorados, puede adquirirse conjuntamente con un equipo de destilación que permite la recuperación de la mayor parte del líquido residual que se genera. El coste de estos productos es, actualmente, bastante elevado en

comparación con los disolventes halogenados. Si bien la inversión inicial puede ser importante, su amortización la convierte en una opción viable desde el punto de vista económico.

En lo que respecta al otro gran grupo de desengrasantes, el de los **desengrasantes químicos** y electrolíticos, cabe citar también la limitación en el uso de desengrasantes que contengan elevados niveles de fosfatos, así como derivados del EDTA, para evitar la formación de complejos solubles entre estos compuestos y los metales. La problemática radica en el hecho de que es preciso liberar el metal del complejo formado para su posterior precipitación. Para dicha liberación son necesarias unas condiciones tales que hacen inviable el proceso de depuración, ya que, entre otras condiciones, se requieren: un elevado tiempo de tratamiento y, por lo tanto, un más que considerable incremento del coste de depuración de las aguas residuales. Como alternativa, técnicamente viable, proponemos la utilización del **gluconato sódico**, compuesto que forma un tipo de complejo metálico de menor fuerza, con lo cual no dificulta tanto la posterior precipitación de los metales complejados.

- Decapado

En cuanto a los **decapados**, podemos decir que la tendencia habitual es la utilización de ácido clorhídrico. Éste aumenta la velocidad de ataque del metal cuando aumenta la concentración del hierro disuelto, lo que provoca un difícil control de esta velocidad de ataque. La alternativa más común es la **sustitución de este ácido por ácido sulfúrico**, que permite un control del ataque del metal a través del seguimiento de la temperatura del baño.

- Niquelado electrolítico

No existe, por ahora, **ningún sustituto alternativo al proceso de niquelado electrolítico**; las únicas medidas que se pueden implantar se derivan de la racionalización en los lavados posteriores al proceso y de su recuperación en la solución de trabajo.

- Proceso de cromado

En la bibliografía existente al respecto se plantea, como solución alternativa, **el uso del cromo trivalente frente al hexavalente**, ya que la toxicidad del primero es considerablemente inferior respecto a la del segundo.

El problema que se origina con la utilización de la forma trivalente, en lugar de la hexavalente, es que se forman unos depósitos oscuros sobre la superficie de la pieza bañada y no se consigue la calidad deseada del producto.

Otras opciones, a utilizar cuando no sea posible la sustitución por cromo trivalente, pueden ser:

- la utilización de técnicas de evaporación permite recuperar más cantidad de agua de los enjuagues de recuperación y, por tanto, devolver más cantidad de producto. Incrementando el número consecutivo de enjuagues de recuperación se puede conseguir evitar o reducir al mínimo el vertido de agua con contenido de cromo.
- la utilización de resinas de intercambio iónico con la posterior recuperación del eluido en forma de ácido crómico concentrado.

- Baño de cobre:

Entre todas las posibilidades existentes entre los baños de cobreado, las más extendida por sus prestaciones sigue siendo el baño alcalino cianurado. Sí que es cierto que, **para determinadas aplicaciones concretas se puede sustituir el baño cianurado por una opción (alcalina o ácida) no cianurada**. No obstante, es preciso efectuar un análisis caso por caso y realizar pruebas para constatar si la calidad sobre la pieza es la pretendida.

- Baños de latón

Actualmente, **no existe ninguna alternativa viable a la utilización de compuestos cianurados** en la formulación de los baños de latón.

Por lo tanto, deberán aplicarse medidas de minimización como, por ejemplo, la reducción de la concentración de los compuestos cianurados en el baño y la incorporación de los enjuagues de recuperación, y medidas de corrección consistentes en la oxidación de los cianuros y la precipitación de los metales.

- Baños de plata

En este caso nos **encontramos con el mismo problema que en el caso del baño de latón**, teniendo como única alternativa la oxidación de cianuros y la precipitación y posterior recuperación de plata.

- Baños de oro

Al tratarse de un metal de elevado coste, podemos decir que **actualmente ya se recuperan todas las soluciones gastadas** y que intervienen en el proceso productivo, bien sea por precipitación o bien mediante resinas de intercambio iónico.

De este modo, el cianuro de oro y potasio (AuKCN_2), ya sea en medio ácido o alcalino, se disocia a fin de permitir la deposición del oro, mientras que la pequeña cantidad de cianuro libre que queda resultante del proceso, se oxida automáticamente en el ánodo de la cuba electrolítica, minimizándose de esta forma la contaminación por parte de este compuesto tan tóxico.

Para obtener la precipitación del oro que queda en las cubas de lavado, separándolo del resto de la molécula de cianuro, se utiliza generalmente cinc en polvo, aluminio o ditionato sódico, que actúan rompiendo la molécula de cianuro de oro y hacen precipitar el oro. El poco cianuro libre que queda puede oxidarse posteriormente sin ningún problema.

- Proceso de cincado

Tal y como hemos visto anteriormente, el cinc es depositado por tres vías:

- vía ácida,
- vía alcalina cianurada,
- vía alcalina sin cianuro.

Evidentemente, los tres procesos implican la formación de unos compuestos distintos según la vía utilizada. Por lo tanto, es interesante proponer aquellos procesos que, por un lado, originen menos compuestos y menos tóxicos y, por otro, tengan buen tratamiento posterior.

De acuerdo con este criterio, el actual estado de la técnica se está decantando por la sustitución de los procesos cianurados a favor de los **procesos ácidos o alcalinos sin cianuros** (debido a la toxicidad que presentan el cianuro y sus complejos). En este sentido, ya se encuentran en el mercado, desde hace unos cuantos años, estas alternativas que presentan una elevada efectividad tecnológica.

Así pues, las otras dos alternativas técnicamente viables a considerar son las de **cincado ácido y cincado alcalino no cianurado**. A continuación se describen cuáles son sus posibilidades de cara a la prevención en origen de la contaminación.

En el **proceso de cincado ácido** se producen, como principales contaminantes, cloruros, ácido bórico y amonio.

Entre todos ellos, el amonio es un compuesto que se puede eliminar actualmente en las formulaciones de este proceso: se trata de **sustituir el cloruro amónico por cloruro potásico**, con lo cual se puede reducir significativamente la contaminación del proceso.

La sustitución del proceso de cincado ácido por otra alternativa no es posible hoy en día. Además, por el hecho de tener un rendimiento catódico muy próximo al 100%, lo convierte en un proceso imprescindible en el tratamiento de acero templado y material sintetizado, ya que estos materiales son muy difíciles de tratar con procesos de bajo rendimiento catódico, debido a la gran formación de hidrógeno que se deposita sobre el material, lo que imposibilita la deposición del cinc.

El otro tipo de proceso, el de **cincado alcalino sin cianuro**, ha significado un gran avance tecnológico. Gracias a su formulación a base de óxido de cinc e hidróxido sódico, se puede utilizar alternativamente en muchas industrias, a la vez que disminuye considerablemente su grado de contaminación (comparado con el cianurado).

Además, el posterior tratamiento de las aguas residuales es bastante más sencillo y rápido que en el caso del cianurado, ya que se puede depurar con un simple ajuste del pH a 9,2-9,5, empleando ácido sulfúrico diluido o hidróxido de calcio.

- Pasivación del cinc

En la formulación utilizada actualmente para pasivar el cinc intervienen algunos de estos compuestos ácidos: crómico, clorhídrico, sulfúrico, nítrico, acético, fosfórico o fórmico. Estos compuestos producen diferentes acabados cromáticos sobre la superficie del cinc.

La mayoría de los procesos de pasivado utilizan el cromo VI como componente básico de estos pasivados.

Estas soluciones han de ser cambiadas frecuentemente y, además de estos mismos contaminantes mencionados, cabe destacar los siguientes, como más remarcables: Zn, Fe y Cr III, que provienen del ataque a las piezas cincadas y de la reacción de óxido-reducción del CrVI a CrIII.

Una vez más, nos encontramos con un elemento especialmente contaminante como es el Cr VI. Desgraciadamente, a pesar de los numerosos esfuerzos que se están llevando a cabo para sustituirlo, no

existe ningún elemento que lo pueda reemplazar de manera efectiva, desde el punto de vista de la calidad estética del producto, no de las propiedades que confiere a la superficie⁵.

- Oxidación anódica del aluminio

Respecto a este proceso, distinguiremos las dos fases que lo componen: preparación superficial y anodizado propiamente dicho.

Entre los principales contaminantes hallados, tenemos los álcalis, fosfatos, tensoactivos, aluminio, aceites y grasas.

En el proceso de desengrase y satinado del aluminio, se produce una buena parte de los contaminantes descritos. En la actualidad resulta difícil indicar un proceso alternativo menos contaminante. Una posible alternativa podría ser la de recircular los baños de desengrase, previo tratamiento por un equipo de separación y concentración de aceites.

Durante el anodizado del aluminio se va disolviendo una parte del mismo en el propio baño de proceso. Llega un punto en el que su concentración es tan alta que disminuye considerablemente el rendimiento del baño, por lo cual éste tiene que ser diluido y vuelto a concentrar de nuevo con ácido sulfúrico. Esto origina dos tipos de contaminantes principales: el ácido sulfúrico y el sulfato de aluminio.

La única técnica a aplicar hoy en día, totalmente probada y contrastada, es la **utilización de resinas de intercambio iónico o de retardo iónico** que permiten separar el aluminio del ácido sulfúrico, que puede volver al tanque de trabajo.

- Electropulido

Los procesos de electropulido del acero inoxidable se basan en la utilización de ácidos minerales concentrados. Actualmente, no existen procesos alternativos menos contaminantes. Sin embargo, las corrientes residuales generadas, tanto por tipo de compuestos como por volumen, no representan un problema técnico difícil de resolver.

⁵ Cabe mencionar que hace unos años se inició, por parte de algunos países europeos, la **utilización del Cr III** como alternativa, sobretudo para aquellos productos que no tienen un componente estético importante.

Además, la futura limitación del uso del Cr VI en recubrimientos de pasivado en el sector automovilístico europeo, favorecerá la búsqueda de alternativas, entre las cuales se impone con fuerza el uso del Cr III.

Las medidas a proponer están basadas en la mejora de los sistemas de depuración mediante la neutralización de los efluentes generados con hidróxido cálcico. Este tratamiento permitirá reducir tanto la contaminación por metales pesados (hierro, cromo, níquel, etc.) como la presencia de aniones no deseados (sulfatos y fosfatos).

- Cadmiado

En muchos países, el proceso de cadmiado ha sido sustituido por cuestiones de salud, ya que se ha demostrado su efecto carcinógeno. La alternativa ha consistido en la utilización de procesos de estannato y argentato, que proporcionan las características de conductividad y soldabilidad necesarias. También se están empleando baños de cinc aleados para conseguir un efecto anticorrosivo.

Otras alternativas, fuera del sector de baños galvánicos, son los tratamientos térmicos o, incluso, el metalizado al vacío, que requieren, sin embargo, instalaciones específicas.

3.1.2 Buenas prácticas

3.1.2.1 Prolongación de la vida de los baños

El industrial del sector de tratamiento de superficies deberá considerar, de forma reflexiva, los baños de proceso de que dispone y, de acuerdo con la evolución técnica de los fabricantes, decidir si los que utiliza son los más adecuados a sus necesidades o no. Este análisis deberá considerar:

- la gama tecnológica (sucesión de operaciones a realizar),
- el tipo de baño a emplear.

Una vez decidido el tipo de baño, teniendo en cuenta también la problemática ambiental que pueda llevar implícita, deberá considerar los siguientes aspectos clave en la gestión de los baños:

- Escoger las concentraciones en sales lo más bajas posible y compatibles con los objetivos perseguidos en cuanto a acabados.
- Los ajustes en sales de productos se deberán realizar bajo criterios objetivos, según el consumo eléctrico en el proceso (a mayor amperaje, más consumo de sales) y según analíticas periódicas de la concentración de los baños. Dentro de las analíticas a realizar, es preciso efectuar las siguientes, como fundamentales:

- cianuros libres, carbonatos;
 - acidez total y libre;
 - alcalinidad total y libre;
 - pH, cloruros, ...
 - determinados metales: Ni, Cu, Cr⁶, ...
- Para cada baño, es recomendable disponer de su ficha de control, donde queden reflejadas las siguientes informaciones:
- fórmula constitutiva del baño;
 - resultados de los análisis;
 - ajustes efectuados;
 - operaciones de mantenimiento de los baños.
- En lo que respecta al mantenimiento de los baños, podemos apuntar los siguientes como genéricos:
- filtración sobre carbón activo
 - oxidación con peróxido de hidrógeno
 - precipitación de impurezas y filtración posterior
 - eliminación regular de piezas y utensilios que caigan dentro del baño de proceso
 - eliminación de impurezas sobre cátodos inertes (por ejemplo, de acero inoxidable), especialmente para metales indeseables que contaminen el baño.
 - retirada de los ánodos cuando el baño no se está utilizando
- En el apartado 3.2.1. de este mismo informe, se detalla cómo prolongar la vida de los dos baños de proceso que con más frecuencia tienen que vaciarse y reformularse de nuevo: el desengrase y el decapado.

3.1.2.2 Reducción de arrastres

El arrastre es la cantidad de líquido que se extrae involuntariamente de una cuba con la operación de extracción de las piezas entre dos etapas de proceso galvánico cualquiera. Normalmente, se mide en litros/hora (l/h), aunque también se puede medir en función de la producción (l/dm², por ejemplo).

Se trata de la fuente más significativa de pérdida de materias primas procedentes de los baños de proceso y de contaminación de las aguas de lavado⁶. Se puede afirmar que el volumen de fango generado es directamente proporcional al nivel de contaminación del agua de lavado contaminada, es decir, al nivel de arrastre que tiene lugar.

A pesar de todo lo mencionado hasta ahora, cabe indicar que el arrastre no tan sólo supone aspectos negativos para la empresa (consumo de agua de lavado, pérdida de materias primas y generación de contaminantes); también presenta un aspecto beneficioso: el arrastre, al igual que se lleva materias primas del baño, también se lleva posibles contaminantes presentes en él, provocando un efecto de dilución. De hecho, un caso típico es la presencia de impurezas en los ánodos y que acaban pasando al baño, contaminándolo. El arrastre permite mantener la concentración de estas impurezas a un nivel tal que no afecta a la vida y al funcionamiento del baño.

Es fundamental, llegados a este punto, volver a relacionar el concepto de arrastre con el de “necesidad de lavado” o “razón de lavado” o “criterio de lavado”, entendiendo como tal el *número de veces que el líquido arrastrado con las piezas tiene que ser diluido en el proceso de lavado a fin de que la calidad final del proceso no se vea afectada*. Este concepto nos da una medida cuantitativa de la eficacia del proceso de lavado. Este parámetro está inversamente relacionado con el concepto de arrastre, según la expresión:

$$C_0 / C_r = Q / q$$

Donde:

C₀ = concentración inicial del baño

C_r = concentración media del baño en el agua de lavado

q = arrastre (l/h)

Q = caudal de agua de lavado (l/h)

Teniendo en cuenta la expresión anterior, es fácil determinar cómo se puede estimar el arrastre. Empíricamente, el industrial puede determinarlo aplicando la siguiente expresión, derivada de la anterior:

$$q = C_r / C_0 \cdot I / t$$

Donde, en este caso:

C₀ y **C_r** son los mismos factores que en el caso anterior.

⁶ De hecho, el arrastre se considera el causante de la mayor parte de generación de residuos debido al tratamiento de agua necesario.

I: volumen de la cuba de lavado

t: tiempo en horas

Por consiguiente, es preciso que el industrial efectúe analíticas para determinar alguna especie química que nos pueda servir para introducirla en la última expresión y poder, de este modo, determinar el arrastre provocado por la actividad de la empresa.

Estos dos conceptos que hemos tratado hasta ahora, arrastre y criterio de lavado, como se desprende de todo lo dicho, son esenciales y, desgraciadamente, desconocidos o indeterminados por parte de la inmensa mayoría de empresas del sector. Puesto que no se conoce el arrastre que se provoca en la operación productiva y dado que tampoco se determina la calidad de lavado que se necesita, nos encontramos, mayoritariamente, con caudales de lavado muy superiores a los necesarios (con todo lo que esto supone, como se ha puesto de manifiesto) o, en pocos casos, caudales de lavado insuficientes y, consiguientemente, contaminaciones entre baños y acabado final defectuoso de las piezas.

Queda clara, pues, la importancia de establecer el *criterio de lavado* o *razón de dilución (Rd)* con objeto de aportar alternativas reales de minimización al sector.

Son valores medios de arrastre estándar:

- bastidor: 150 ml/m² procesado
- tambor: 1-3 l/tambor

El conocimiento de los condicionantes que contribuyen al arrastre es clave si se desea reducirlo. Los factores principales son los siguientes:

1. tamaño y forma de las piezas
2. viscosidad y concentración química del baño
3. tensión superficial del baño
4. temperatura del baño y
5. forma de trabajar

Con todos estos factores, podemos establecer que el arrastre es directamente proporcional a la superficie de la pieza y a la viscosidad, concentración y tensión superficial del baño, e inversamente proporcional a la temperatura y densidad del baño.

Una vez determinados los factores que favorecen el arrastre, será más sencillo abordar el concepto fundamental de *minimización del arrastre*.

Existen diversas técnicas y métodos para reducirlo de forma muy significativa y eficaz. Algunos de estos sistemas no representan ningún coste adicional para la empresa, ya que pueden suponer tan sólo trabajar en condiciones diferentes; en todo caso, las inversiones requeridas suelen ser pequeñas y, por contra, aportan unos niveles elevados de reducción en el arrastre⁷. En ciertos casos, otros factores pueden dificultar la implantación de la medida; por ejemplo, condicionantes de proceso o falta de espacio.

Hemos procurado que las alternativas que proponemos a continuación sean lo más exhaustivas posible y se expliquen con cierto detalle, para establecer claramente su importancia; están ordenadas por su nivel de inversión requerido, empezando por las de menor cuantía:

- Mantener el baño a la mínima concentración posible, ya que de este modo conseguimos reducir su viscosidad.

En general, el proveedor del baño recomienda concentraciones superiores a las realmente necesarias, a fin de asegurar la calidad del acabado final y de obtener el máximo rendimiento.

Es muy importante que la empresa, de forma empírica, establezca la mínima concentración posible de trabajo de sus baños, por ejemplo, a base de ir reduciéndola mediante la adición de baño más diluido, hasta que empiece a detectar que éste ya no opera adecuadamente. En este punto, la empresa puede identificar la concentración óptima del baño de proceso que ofrece la adecuada calidad final del producto.

- Trabajar a la máxima temperatura posible del baño, provocando también una disminución de su viscosidad, favoreciendo el drenaje de líquido. Con esta medida, también se incrementa el rango de evaporación del baño, lo que permite la introducción de lavados estancos de recuperación que contribuyen especialmente a la reducción del arrastre, como veremos más adelante.

Es necesario controlar, no obstante, que el líquido humectante que sale con la pieza no se seque en su superficie y forme depósitos que afecten a la calidad del proceso.

- Adición de agentes humectantes, para reducir la tensión superficial del baño. Esta medida puede reducir el arrastre hasta en un 50%.

⁷ Grandes reducciones en los costes de la empresa, por lo tanto.

Sin embargo, hay industriales que prefieren no usar estos productos porque forman espuma en el baño y ensucian la pieza al extraerla. En todo caso, hay que indicar que su uso deberá ser evaluado según las características propias del baño y del acabado final que se persigue.

- Incorporación de sistemas de soplado, que actúan sobre el baño, favoreciendo el drenaje del líquido atrapado por las piezas.

- Introducción de sistemas de vibrado, también con el bastidor encima del baño, posibilitando asimismo un mayor drenaje del líquido.

- Utilización de mecanismos de lavado por spray, encima del propio baño de proceso, especialmente indicado en aquellos que trabajan en caliente. Al efecto de lavado del agua hay que añadir el efecto mecánico del spray.

Por otra parte, al efectuar un primer lavado sobre el baño, devolvemos al mismo la mayor parte del líquido arrastrado por la pieza (hasta un 50%). El único condicionante que presenta el sistema es, como se ha mencionado, que el baño opere a cierta temperatura (>40°C) a fin de que la evaporación que tiene lugar la podamos compensar con el lavado por aspersion sobre el propio baño.

- Incorporación de tapajuntas entre la cuba del baño y la del lavado posterior. Si este elemento tiene la inclinación adecuada hacia el baño, le podremos devolver a éste todo el goteo que se produce, procedente de las piezas, entre cubas.

- Introducción de sistemas de succión de líquido en tambores: se trata de aplicar una pequeña presión negativa, que se ejerce en el tambor para recuperar el líquido que contiene.

Esta medida, cuya implantación no es demasiado habitual, permite reducir alrededor de un 30% las pérdidas por arrastre.

- Elección de los bastidores: en algunos casos, los bastidores pueden representar una superficie superior a la de las piezas tratadas. Será necesario, pues, realizar un estudio profundo de la forma y estructura de estos bastidores, de modo que se obtenga la menor superficie posible.

En cualquier caso, los bastidores plastificados presentan una superficie hidrófoba y, por consiguiente, arrastrarán una cantidad de solución mucho menor que los bastidores metálicos.

- Lavados estancos de recuperación: se cuentan, con muchas probabilidades, entre las alternativas más eficientes para reducir el arrastre hacia las aguas de lavado, permitiendo al mismo tiempo recuperar las materias primas de nuevo hacia el baño originario.

Por otra parte, de forma indirecta, permiten la reducción del caudal de renovación de agua del lavado posterior: si, pongamos por caso, el lavado estanco tiene el 20% de la concentración del baño, el caudal de lavado posterior puede ser dividido por 5. El método consiste en intercalar uno o más lavados de agua estancos entre la posición del baño de proceso y los lavados posteriores.

El agua de este lavado, preferiblemente, debe ser destilada, ya que el agua de red, que contiene sales, puede acabar contaminando el baño.

Al tratarse de un lavado estanco, otra recomendación interesante a efectuar, en la que muchas veces las empresas no piensan, es el hecho de agitar por aire –o mecánicamente– el lavado, para incrementar su eficiencia.

El lavado se va concentrando en sales procedentes del baño de proceso y, a determinada concentración, por término medio el 20% de la del baño, se retira una parte de este líquido y se introduce de nuevo en el baño de proceso del cual proceden las sales. Este volumen viene determinado por el rango de evaporación del baño. De este modo, al igual que sucede con los lavados por spray, es preciso que el baño opere a cierta temperatura, también aquí superior a los 40 °C, para que se pueda aplicar el sistema.

Algunas empresas ponen impedimentos a la utilización de lavados estancos de recuperación, por temor a contaminar el baño⁸. También puede suceder que, en determinados baños de proceso, algunos de los componentes se desestabilicen cuando se encuentran diluidos, alterando la composición química del baño inicial; éste es el caso de los baños de níquel y cobre químico.

También es posible que se contamine el lavado estanco porque, accidentalmente, un operario lave en él piezas procedentes de otro baño de proceso (contaminación cruzada entre baños). En todo caso, si el riesgo es de contaminación con impurezas o metales, cabe la posibilidad de “depurar” el lavado estanco antes de devolverlo al baño mediante, por ejemplo, resinas de intercambio iónico.

A pesar de todo, la importancia del sistema es tal que, una vez estudiado el caso concreto, deberá introducirse siempre que esto sea posible.

⁸ Anteriormente comentábamos que el arrastre presenta un factor positivo al diluir la posible contaminación del baño aportada por agentes externos (impurezas de los ánodos, desprendimiento de metales de la superficie de las piezas que se están operando, etc.).

Una variante muy interesante del sistema, con unas claras repercusiones de reducción del arrastre, consiste en la posibilidad de combinar 2, o incluso 3, lavados estancos “en cascada”; es decir, conectados entre sí. Esta disposición se convierte en un sistema de lavados corrientes en cascada (ver apartado 2.3.4), que tienen un caudal lo suficientemente pequeño como para poder ser directamente reciclados en continuo hacia el baño de proceso. El sistema permite el máximo de recuperación de materias primas y de reducción, por lo tanto, del arrastre. Si un lavado estanco puede alcanzar un nivel de reducción del arrastre de un 70%, 2 recuperaciones consecutivas pueden llegar hasta un 90% de reducción de pérdidas por arrastre.

- Lavado ECO: se trata también, como en el caso anterior, de un lavado estanco en el que las piezas son sumergidas antes y después del baño de tratamiento. A diferencia del lavado de recuperación que se va vaciando paulatinamente para compensar las pérdidas por evaporación del baño, en el caso del lavado ECO, éste no se vacía nunca y su concentración se estabiliza al 50% de la del baño. La concentración del arrastre es, por consiguiente, igual a la mitad de la inicial.

Su aplicación se da en baños que trabajan a poca temperatura (<40°C). No es recomendable para los baños de preparación de la superficie (desengrases y decapados) ni finales (pasivados), ya que el contacto de la pieza con una solución relativamente concentrada (aunque sólo sea del 50%), puede originar el inicio de reacciones perjudiciales para la calidad del tratamiento que sigue.

En este caso, se estima que la reducción en el arrastre es inferior al lavado de recuperación y se sitúa entre el 30 y el 50%. A pesar de todo, las mismas ventajas medioambientales del lavado estanco de recuperación son atribuibles al lavado ECO.

Finalmente, cabe mencionar que, tanto en el caso del lavado de recuperación como con el ECO, deberán respetarse los principios del buen lavado:

1. Movimiento relativo turbulento entre la pieza y el agua.
2. Tiempo adecuado de contacto entre la pieza y el agua.
3. Presencia de agua suficiente durante el tiempo de contacto.

- Posición de las piezas en el bastidor: hay que colocarlas de forma que se facilite su vaciado al salir del baño, evitando que se formen zonas donde el líquido quede atrapado. En este sentido, cabe indicar que las piezas se deben colocar preferentemente planas, ya que así se reducirá el grosor de la película de líquido que se arrastra al extraer las piezas.

Hay que evitar, siempre que sea posible, colocar una pieza encima de otra, para impedir que el enjuagado de una pieza superior caiga sobre una pieza inferior. En este aspecto, reviste mucha importancia el diseño del bastidor escogido para el trabajo en cuestión.

Es importante también que el operario incline adecuadamente el bastidor al salir del baño, a fin de favorecer el vaciado.

En el caso del tambor, su diseño también es fundamental de cara a favorecer el drenaje de líquido que se arrastra del baño: agujeros lo más grandes posibles y que no lleguen hasta los márgenes, en el caso de tambores poliédricos (ya que quedaría líquido atrapado en las costillas del tambor).

- Velocidad de extracción de las piezas del baño, que ha de ser lenta: contra más rápidamente se saca la pieza, mayor es el grosor de la película de líquido humectante.

Es preciso que los encargados de planta eduquen y supervisen a los operarios en este sentido.

- Tiempo de enjuagado: es necesario que sea el máximo posible, evitando el secado del líquido en la superficie de las piezas o la posibilidad de “pasivaciones” de la superficie.

Para facilitar esta tarea, es útil colocar barras cuelgabastidores (muy prácticas, sobre todo, cuando el peso a soportar es considerable), en el caso de líneas de proceso manuales.

Está comprobado que el tiempo de enjuagado no presenta estos problemas sobre los baños de pretratamiento (desengrases y decapados); en estos casos, el operario puede volver a operar con el bastidor una vez éste ha goteado todo el arrastre.

Para el tambor, además del tiempo de enjuagado, es importante hacerlo girar 90°, y realizar un buen mantenimiento para evitar el cierre de los orificios. También es importante el buen estado de los bastidores; de lo contrario puede quedar líquido retenido en el interior de grietas y agujeros.

Son valores medios estándares de tiempo de enjuagado:

- para bastidores: 10 seg.
- para tambores: 20 seg.

Para finalizar este apartado que reviste tanta importancia en cuanto a las posibilidades de prevención en origen de la contaminación generada en el tratamiento de superficies, se puede concluir del modo siguiente:

1. El arrastre es la principal fuente de generación de corrientes residuales en el sector de baños galvánicos, suponiendo, al mismo tiempo, una pérdida de materias primas y agua. Debería ser, por lo tanto, objeto de un análisis a fondo para cada empresa en concreto y el concepto principal sobre el que la empresa debería centrar sus esfuerzos para reducir las corrientes residuales generadas.
2. La gran mayoría de las empresas desconoce cuál es el arrastre medio que provoca, así como cuál es el criterio de lavado necesario para su caso particular.
3. Al mismo tiempo, la mayoría de las empresas desconoce qué factores contribuyen a minimizar el arrastre, con lo cual no actúa sobre él.
4. Existe un buen número de alternativas y de opciones para minimizar el arrastre, la mayoría de las cuales o bien no suponen ningún coste de inversión para la empresa o bien éste es lo suficientemente bajo como para que el período de devolución sea muy corto, teniendo en cuenta la importante reducción de coste que esto representa en compras de materias primas, consumo de agua y tratamiento y gestión de residuos.

3.1.2.3 Mejoras en los enjuagues y lavados

Con todos los conceptos descritos en el apartado 2.3. correspondiente a los sistemas de lavado, nos encontramos en condiciones de analizar los distintos métodos para reducir el consumo de agua en la planta galvánica.

Será necesario, por lo tanto, que el industrial esté en condiciones de definir la estructura óptima de sus lavados, teniendo en cuenta los principales parámetros de elección.

Los medios al alcance del industrial galvánico para reducir el consumo de agua son los siguientes:

- Racionalización de lavados: elección de los sistemas de lavado.

a) Lavado simple.

Se trata del peor sistema de lavado de los que existen del que puede servirse la empresa y, aún así, es prácticamente el más extendido dentro del sector.

Consiste, como ya hemos visto, en disponer de una sola cuba de lavado de agua corriente después del baño de tratamiento. En este caso, el caudal de agua de lavado, para determinada razón de dilución (Rd), es:

$$Q = q \text{ Rd}$$

En general, se puede afirmar que el caudal (Q) de lavado necesario para asegurar una razón de dilución satisfactoria es muy elevado si lo comparamos con otras posibilidades.

b) Lavado doble (y múltiple) en paralelo.

Lo encontramos en aquel caso en el que cada cuba de lavado después del baño (2 o más) está alimentada por separado (en paralelo). En este caso, la expresión matemática que determina el caudal de lavado viene dada por la siguiente:

$$Q = Q_1 + Q_2 + \dots + Q_n = n q \sqrt{\text{Rd}}$$

donde n = número de cubas de lavado.

No es un sistema demasiado utilizado ya que, para el mismo número de cubas de lavado, con el siguiente sistema se obtiene una reducción mucho mayor del caudal de agua de lavado necesario para una misma razón de dilución.

c) Lavado doble (y múltiple) en serie (cascada).

Se trata de los mejores sistemas de lavado disponibles. El sistema consiste en introducir agua corriente limpia en la última posición del sistema de lavado, pasando en cascada hasta la primera cuba. Las piezas a lavar se mueven en sentido contrario, es decir, a contracorriente. A diferencia del caso anterior, sólo tenemos una alimentación de agua limpia (en la última cuba).

En este caso, el caudal de agua necesario viene dado por:

$$Q = q \sqrt[n]{\text{Rd}}$$

donde, aquí también, n corresponde al número de cubas de lavado que integran el sistema.

En este supuesto, el ahorro que se obtiene en el consumo de agua gracias al incremento del número de cubas (n) es importante. En la tabla siguiente se facilitan algunos consumos de agua en función del número de cubas en cascada, para poner un ejemplo concreto. Se puede apreciar la importante reducción del caudal a medida que se incrementa el número de lavados:

Sistema de lavado	Caudal de lavado Q (l/h)
Lavado simple	10.000
Doble lavado en cascada	220
Triple lavado en cascada	65

Tabla 6

Suponiendo:

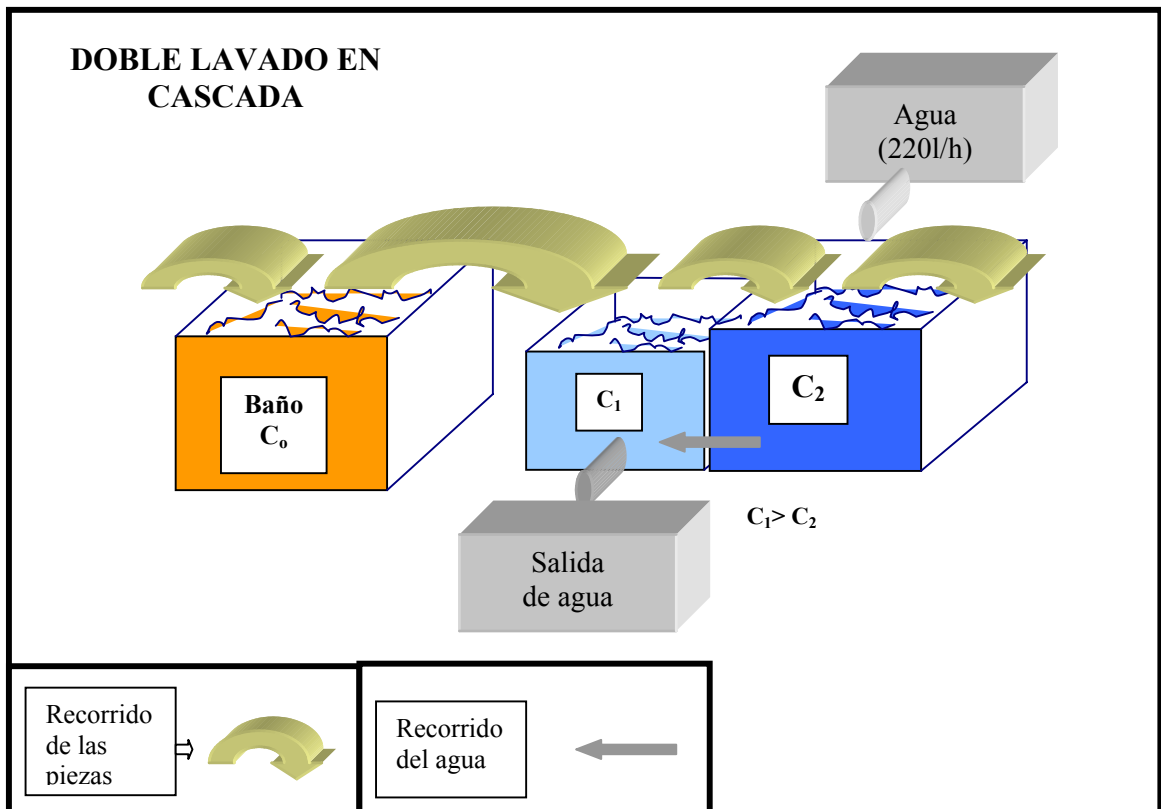
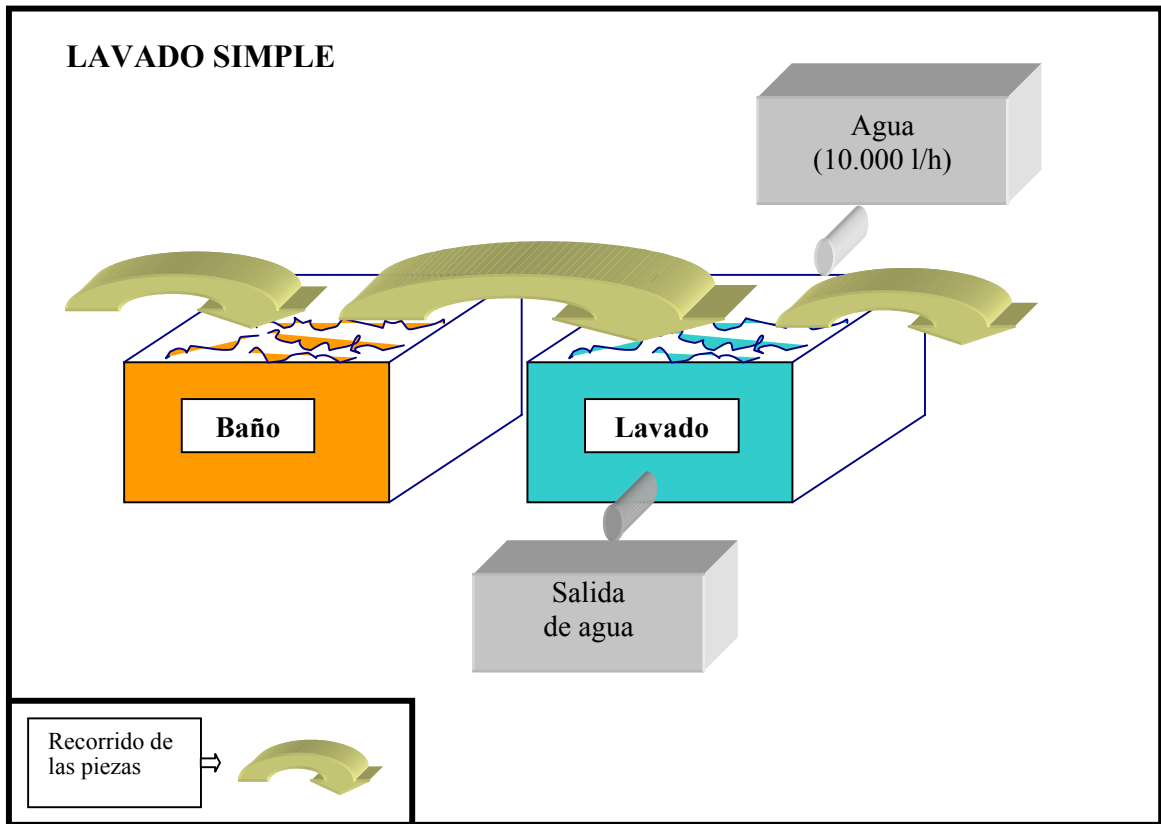
arrastre (q) = 5 l/h

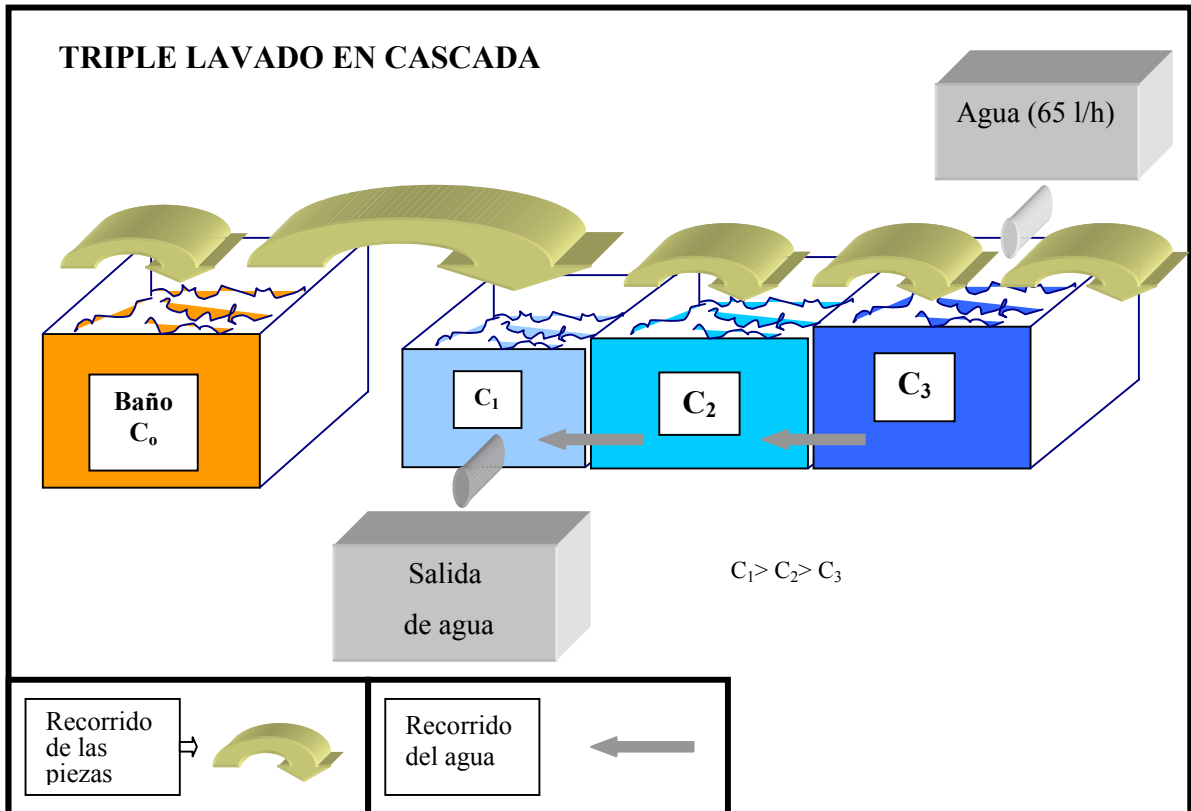
razón de dilución (R_d) = 2000

Este ejemplo muestra la importancia de una racionalización de los lavados, permitiendo:

1. consumir menos agua para una misma razón de dilución,
2. reducir, de este modo, los costes de consumo de agua y de depuración,
3. incrementar la calidad del lavado sin tener que aumentar el consumo de agua.

En forma gráfica, tendríamos:





d) Lavado estanco.

Se trata de un lavado sin renovación que permite retener una buena parte del arrastre procedente del baño de proceso. Por lo tanto, además de reducir las necesidades de lavado posteriores –y el consumo de agua– posibilita la recuperación de sales del baño.

A pesar de ser estanco, para evitar su progresiva concentración en sales que provienen del baño de proceso, se debe proceder periódicamente a su renovación. En el caso de que el baño precedente trabaje en caliente –a más de 50°C–, esta renovación sirve para reintroducir en ella las pérdidas de agua por evaporación y de agua y sales por arrastre.

Unos valores de concentración del lavado estanco comprendidos entre el 10 y el 20% de la concentración del baño son perfectamente admisibles para esta doble función.

Una estructura muy efectiva es la de mantener 2 o más lavados estancos conectados en cascada, haciendo volver el líquido recuperado hacia el baño del cual procede. De esta forma, se puede recuperar el máximo de producto de un modo sencillo. En este caso, se ha de procurar que el caudal de entrada de agua en la última posición de cuba sea igual al caudal de evaporación del baño de proceso.

Esta recuperación de producto será superior si la evaporación del baño es mayor o si hay más lavados estancos conectados en cascada.

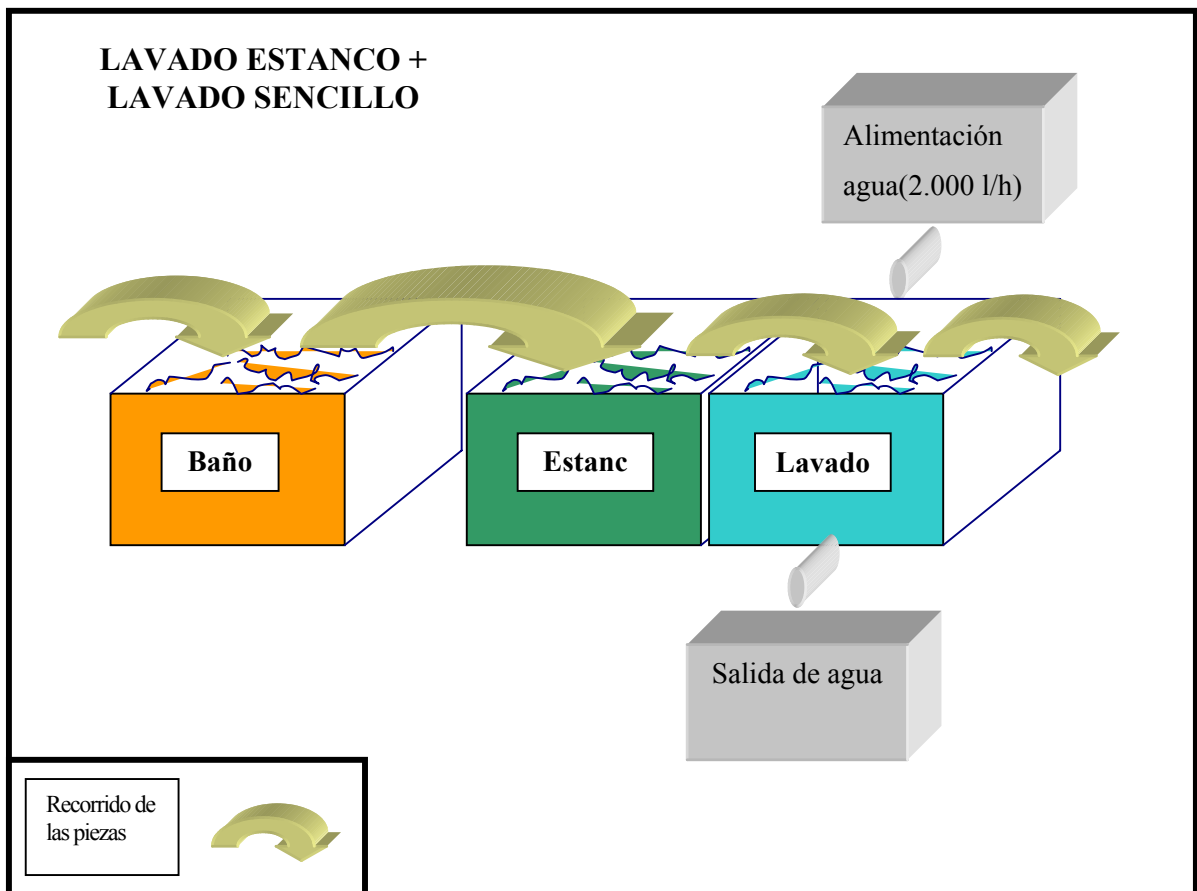
En la siguiente tabla se expone un ejemplo comparativo con esta casuística:

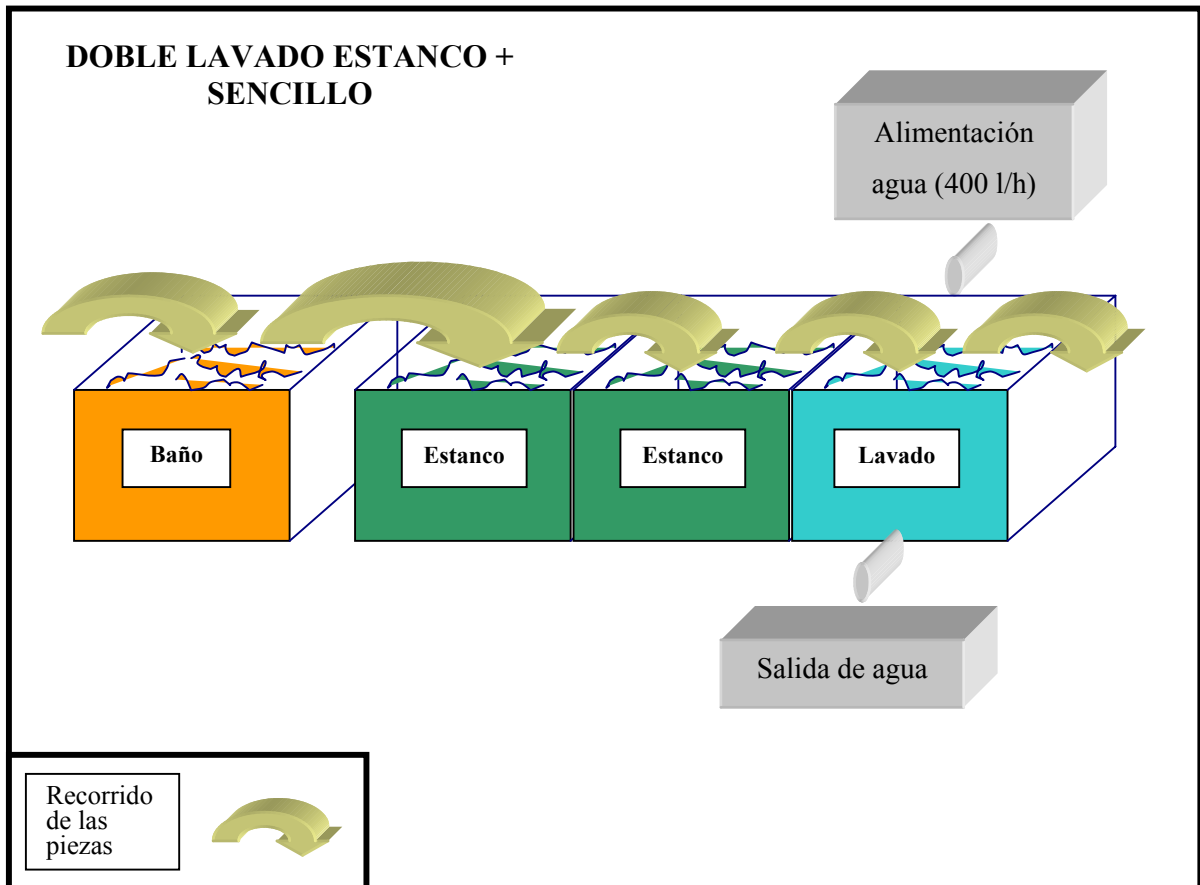
Sistema de lavado	Caudal de lavado Q (l/h)
Lavado simple	10.000
Lavado estanco + lavado sencillo	2.000
Doble lavado estanco + sencillo	400

Tabla 7

Suponiendo:

arrastre (q) = 10 l/h
razón de dilución (Rd) = 1000





e) Lavado ECO.

El lavado ECO es también un lavado estanco en el que las piezas son sumergidas antes y después del baño de tratamiento. No se vacía nunca –ni parcialmente– y su concentración se estabiliza a la mitad de la del baño de proceso. De este modo, se consigue una concentración en el arrastre la mitad de la inicial. Tampoco implica variación del volumen de la cuba, ya que se aplica habitualmente a baños fríos o poco calientes - <math><40^{\circ}\text{C}</math> .

A pesar de estas ventajas, no es recomendable aplicarlo a los baños de preparación (desengrasas y decapados) o de final (pasivado), ni tampoco a los baños de proceso químico (cobre o níquel químico), ya que al hallarse este lavado a la mitad de concentración que la del baño, pueden originarse reacciones con la superficie de la pieza que podrían perjudicar la calidad del tratamiento posterior.

Los lavados ECO permiten:

- recuperar materias primas,
- limitar los arrastres –en teoría entre el 30 y 50%–

- por lo tanto, reducir el consumo de agua de lavado posterior.

f) Lavado por aspersión.

Consiste en proyectar una fina niebla de agua de lavado directamente sobre las piezas que salen del baño de proceso, ya sea directamente encima del baño –si trabaja en caliente–, como sobre una cuba vacía e, incluso, encima del lavado posterior.

Como ventajas, el sistema presenta las siguientes:

1. Reducción del consumo de agua de lavado. Un lavado por aspersión es como uno en cascada.
2. Mejora de la calidad de lavado gracias al efecto hidromecánico de las gotas del agua impactando con la superficie de la pieza a lavar.
3. Posibilidad de recuperar sales, en el caso de baños a temperatura, al realizar un primer lavado sobre la cuba de proceso.

La limpieza por aspersión presenta, como vemos, importantes ventajas en lo que respecta a la eficacia y economía del agua. No obstante, el uso de los enjuagues por aspersión plantea algunos problemas a tener en cuenta:

- Instalación complicada y mantenimiento considerable.
- Necesidad de agua de calidad.
- Peligro de formación de aerosol que puede afectar a la seguridad en el trabajo.

Para concluir este punto, hay que indicar los parámetros que el industrial galvánico deberá considerar al definir su sistema de lavado:

- calidad de lavado deseada para cada posición: determinación de la razón de dilución (Rd);
- disponibilidad de agua y caudales de entrada (Q);
- concentración de los baños y naturaleza de su composición;
- caudal de arrastre estimado (q);
- capacidad para recuperar el arrastre hacia los baños;
- espacio disponible en el taller;
- condicionantes operativos en planta;
- límites de vertido a cumplir.

- Otros métodos para reducir el consumo de agua.

a) Reducción del consumo desmedido.

En determinadas ocasiones, se observa que muchos talleres galvánicos presentan un consumo de agua extraordinariamente elevado, no justificable con las necesidades óptimas de lavado. Entre las principales razones de este consumo desmedido podemos citar las siguientes:

- alimentación de agua innecesaria en posiciones de lavado, por ejemplo, sin producción;
- exceso de lavado en determinadas posiciones por encima de la razón de dilución;
- lavados excesivos de cubas, bidones, instalaciones, suelos, etc.;
- pérdidas diversas: grifos mal cerrados, fugas, etc.

La importancia de este consumo puede cifrarse, en algunos casos, hasta el 40-50% del consumo total de agua de la empresa.

Como alternativas de minimización, cabe aportar las siguientes:

- colocación de electroválvulas que cierren la alimentación de agua si no hay proceso, ya sea por medida de la conductividad del agua como por temporizadores;
- lavar instalaciones y equipos con medios a presión, reutilización de agua de segundos lavados para los primeros lavados, etc.;
- correcto mantenimiento de instalaciones, control y supervisión, formación del personal, etc.

b) Mejora de la calidad de lavado.

Una vez escogida la estructura de lavados, aún se puede mejorar la calidad del lavado de manera significativa, por ejemplo:

- reduciendo el volumen y la concentración de los arrastres;
- calentando determinados lavados;
- introduciendo sistemas de agitación en el lavado;
- utilizando agua de muy buena calidad para aquellos lavados críticos y para algunos lavados finales.

De hecho, al mismo tiempo que se mejora la eficiencia de un lavado hay que contar con tres estrategias que se pueden utilizar:

- controlar el tiempo de contacto entre la pieza y el sistema de lavado. Es fácil constatar como, habitualmente, este tiempo es inferior al que en realidad se precisa.
- forzar una pequeña turbulencia (mediante agitación) del agua de lavado que provocará un lavado más eficiente.
- procurar disponer de suficiente volumen de agua durante el tiempo de contacto entre la pieza y el sistema de lavado.

La combinación de estas tres estrategias aumenta, de manera considerable, la eficiencia de las operaciones de lavado y contribuye a una disminución de la cantidad de agua necesaria.

c) Reutilización de determinadas aguas.

Otra posibilidad, poco utilizada por los industriales, es la de reutilizar las aguas de determinados lavados, por ejemplo, para otra posición de lavado que sea compatible con la primera. Con esta sencilla medida se puede llegar a reducir a la mitad el consumo de agua de las dos posiciones de lavado. No obstante, es preciso asegurar la compatibilidad entre baños.

Como ejemplos, podemos aportar los siguientes:

- un segundo lavado después de un desengrase se puede reutilizar para un lavado después de un decapado ácido o alcalino; o a la inversa;
- un lavado posterior a una activación (pasivación o neutralización) se puede emplear como lavado después del pretratamiento;
- un lavado posterior a una pasivación crómica de cinc se puede reutilizar para un lavado posterior al cromado (excepto el lavado final);
- si el proceso de depuración de aguas residuales es correcto, muchas veces se puede reutilizar el agua depurada para distintos lavados de pretratamiento (hay que vigilar, sin embargo, su conductividad para evitar concentraciones excesivas de sales); también se puede reutilizar este agua para actividades anexas: lavado de tierras e instalaciones, etc.;
- reutilización del agua de enfriamiento de baños para lavados.

Como precaución general, cabe mencionar que antes de tomar la decisión de reutilizar determinado tipo de agua, se deberán examinar los condicionantes que determinen su uso.

3.1.2.4 Buenas prácticas genéricas

Algunas de las recomendaciones a nivel de buenas prácticas profesionales ya se han ido detallando a medida que se proponían mejoras para reducir consumos de agua, o minimizar el arrastre. Las recomendaciones que se describen ahora son más genéricas y afectan a muchas otras actividades de la empresa. Las buenas prácticas profesionales son de tipo integral, ya que actúan al mismo tiempo sobre diversas corrientes residuales.

Por término general, se trata de medidas sin coste económico alguno (al menos directo), o que suponen un coste pequeño y tienen una repercusión muy favorable en la reducción del consumo de materias primas, de la generación de corrientes residuales, mejorando mucho el control y la gestión global de determinadas áreas de la empresa.

Las medidas de buenas prácticas profesionales para la empresa se concretan, ordenadas según su campo de aplicación, en:

- Almacenamiento de materias y residuos

Un almacenamiento deficiente de los materiales es una fuente potencial de obtención de residuos, como por ejemplo: la generación de productos caducados, un mayor riesgo de vertidos de materiales, etc. y supone, al mismo tiempo, un peligro y un riesgo para los propios trabajadores.

Todos los procesos desarrollados por la empresa incluyen el almacenamiento de materias primas, productos, subproductos y residuos, y su transferencia de una zona de la fábrica a otra. El correcto almacenamiento es, por lo tanto, una posibilidad importante para minimizar.

Entre las principales propuestas genéricas por recomendar, tenemos las siguientes:

- Llevar a cabo un control normalizado del estado de suciedad (grasas, polvo, etc.) de las piezas que se reciben para ser tratadas electrolíticamente, a fin de procurar que lleguen lo más limpias posible.
- Disponer de áreas separadas y adecuadas de almacenamiento para materias primas, productos, subproductos y residuos. Estas zonas han de estar protegidas de las inclemencias del tiempo – luz, lluvia, calor, etc.,– para evitar el deterioro del envase o del producto mismo y disponer de una solera de hormigón hidrófugo y un sistema de recogida de aguas residuales independiente del sistema general. La zona en cuestión ha de estar convenientemente señalizada e iluminada.

- Mantener el orden establecido en el almacén y las distancias entre los materiales, para posibilitar su accesibilidad e inspección. Es preciso, además, mantener las distancias entre los productos químicos incompatibles. Los diferentes bidones se tendrán que ordenar de acuerdo con su peligrosidad y grado de utilización, facilitando su carga y descarga. Todos los materiales tienen que estar convenientemente etiquetados, con indicativos de sus características y normas especiales de manipulación. Es interesante, también, almacenar los contenedores de acuerdo con las indicaciones del envasador o fabricante.
- En caso de apilar materiales, poner siempre los líquidos debajo de los sólidos, manteniendo los recipientes siempre bien cerrados.
- Limpiar las superficies justo antes de su recubrimiento electrolítico, para evitar que se ensucien en el período de almacenamiento.
- Establecer un sistema de gestión de existencias, según el sistema FIFO (*"first-in-first-out"*), que garantice que los materiales almacenados más antiguos sean los primeros en salir.
- Utilizar recipientes de dimensiones adecuadas al uso previsto y a las características del producto, procurando la compra al por mayor, excepto en aquellos materiales de vida corta o que no se consumen en grandes cantidades. Todo esto puede permitir la reducción del número de envases, así como del material perdido en adherencias a las paredes del recipiente. Asimismo, es preferible utilizar contenedores reutilizables, como por ejemplo los de polietileno, que pueden volver a ser reutilizados y, además, son fáciles de transportar y de limpiar. Sin embargo, será necesario vaciar por completo los recipientes para reducir la cantidad de agentes de limpieza necesarios.
- En el caso particular de los residuos, se recomienda prever y adecuar una zona específica y diferenciada para su almacenamiento, tal y como se ha citado anteriormente, con un número de contenedores suficiente para posibilitar su correcta segregación, según sean: líquidos o sólidos, peligrosos o inertes; entre los que sean peligrosos, es necesaria la separación según su composición y, finalmente, separar los distintos tipos de residuos valorizables (chatarra, plástico, cartón, papel, etc.) para permitir su gestión externa y reducir su volumen.

- Control de inventarios

El control de inventarios acarrea como consecuencia fundamental el hecho de que la empresa no tenga más materias, productos y subproductos en la planta de los que realmente sean necesarios por alguna justificación u otra. Además del espacio que ocupa y del inmovilizado que supone, una ausencia de control de inventarios puede derivar en una generación de residuos que provienen de las materias primas y productos innecesarios, caducados o estropeados, lo que supone un doble coste para la empresa.

Como propuestas de buenas prácticas, podemos presentar las siguientes:

- Definir la frecuencia y la responsabilidad por los inventarios.
- Evitar las compras en exceso que puedan llegar a caducar y convertirse en un residuo.
- Estandarizar, cuando sea posible, los materiales comprados, utilizando el menor número posible de compuestos diferentes para un mismo propósito. Esto supone una reducción del coste de compra y mantenimiento, simplifica el control de inventario, mejorando el seguimiento y la utilización de los materiales, y puede permitir reducir la cantidad y variedad de residuos por gestionar.
- Etiquetar y registrar todos los materiales recibidos, indicando el nombre del producto, la fecha de entrada en el almacén y la fecha de caducidad (si procede). Comprobar, al mismo tiempo, que el material venga convenientemente etiquetado.
- Comprar la cantidad de material estrictamente necesaria para cada etapa de producción específica, de forma que no sobre material.
- Controlar todos los materiales al recibirlos, verificando que cumplen con las especificaciones del fabricante y devolver aquellos que no sean conformes.
- Seguir las especificaciones de los proveedores y fabricantes sobre la utilización, manipulación, almacenamiento y tratamiento de los materiales recibidos.
- En el consumo de materiales, como ya se ha dicho, llevar a cabo un sistema de gestión FIFO, realizando una rotación de los contenedores situados al fondo de los estantes hacia delante cuando llega material nuevo. En todo caso, dar instrucciones por escrito y concienciar a los operarios para que utilicen primero los productos que caducan antes.
- Reducir la cantidad de envases parcialmente llenos, promoviendo la utilización del material sobrante de operaciones anteriores. En este sentido, es muy importante adecuar el tamaño del envase a la cantidad necesaria para cada oportunidad, como ya se ha mencionado asimismo anteriormente.

- Manipulación de materiales

Durante las operaciones de manipulación, transporte, trasvase, etc., tanto de materiales como de residuos, se han de adoptar una serie de medidas para evitar vertidos, fugas, contaminación de materiales, etc., que comporten pérdidas y generen corrientes residuales.

Por ejemplo, la contaminación de un residuo a causa de una incorrecta manipulación o segregación, puede generar un volumen superior de residuos, reducir las posibilidades de valorizarlo o comportar su clasificación como especial.

Entre otras, podemos recomendar las siguientes buenas prácticas:

- Las zonas de carga y descarga tienen que estar bien iluminadas, señalizadas, limpias y sin obstáculos, especialmente las zonas de paso.
- Establecer procedimientos escritos para todas las operaciones de carga, descarga y trasvase, prestando especial atención al hecho físico de la carga y la descarga: manipulación de palets, bidones, carreta elevadora, transpalets, bombas, etc. Es muy recomendable comprobar e inspeccionar los equipos que van a utilizar –bombas, filtros, juntas, válvulas– antes de empezar cualquier operación de trasvase, sobre todo cuando se trate de productos líquidos (por ejemplo, los baños de desengrase).
- Por otra parte, hay que preparar también procedimientos escritos de mantenimiento y revisión periódica del estado de las instalaciones utilizadas en la carga, descarga y trasvase de productos: conexiones, juntas, cierres de válvulas, mangas, bombas, etc.
- Disponer los depósitos y recipientes de forma que se evite su ruptura, facilitando la detección de grietas o de corrosión. Los bidones metálicos, por ejemplo, deberán ser aislados del suelo mediante palets de madera para evitar la corrosión por la humedad del suelo.
- Utilizar los recipientes siguiendo las instrucciones del fabricante y sólo para su uso original, asegurando que todos ellos reciben un programa de control y de mantenimiento y están en buenas condiciones.
- Reservar áreas de contención impermeables y limpias alrededor de los tanques o de las zonas de almacenamiento que incorporen elementos –arquetas o cubetas de retención– para recoger las posibles fugas. Estas áreas deberán respetar la separación de los materiales según su naturaleza química y peligrosidad y evitar el contacto con la red de recogida de aguas general de la instalación.
- Asegurarse de que se está trasvasando el líquido correcto al recipiente correcto, por lo cual deberán observarse las normas de etiquetaje que permitan conocer en todo momento el contenido de los bidones almacenados, tal y como ya se ha dicho anteriormente.
- Disponer de sistemas que permitan conocer en todo momento el volumen de líquido en los depósitos de que dispone la empresa, evitando llenar en exceso los depósitos o recipientes y comprobar siempre el nivel del recipiente al cual trasvasamos el líquido, antes de iniciar la operación, por si acaso éste fuera insuficiente.
- Prever, en las zonas de trasvase, la instalación de sistemas que permitan que los operarios dejen enjuagar el tiempo suficiente los elementos empleados en la operación llevada a cabo, especialmente, en las zonas de trasvase de líquidos. Este enjuagado deberá realizarse en un recipiente que permita la recuperación del producto.
- En las operaciones de trasvase de líquidos, proceder con especial atención para evitar posibles salpicaduras y vertidos y utilizar los equipos de forma adecuada (bomba, embudo, etc.).
- Evitar movimientos innecesarios de materiales mediante una planificación esmerada, transportando la cantidad adecuada al lugar adecuado.

- Disponer de forma rápida de los materiales absorbentes adecuados a los productos manipulados normalmente para actuar en caso de fugas. Será preciso disponer de éstos, por consiguiente, cerca de las zonas de manipulación y ser fácilmente accesibles para el personal encargado de las operaciones.

- Operaciones en planta

A continuación, se indican una serie de consejos que se deben implementar durante el proceso de baños galvánicos y todas las restantes actividades relacionadas, asimismo con el objetivo de evitar la generación de contaminación. Algunas de estas recomendaciones ya se han efectuado anteriormente:

- Utilización de baños galvánicos potencialmente menos contaminantes, siempre que esto sea técnicamente posible. Empezando por los baños de preparación y acabando por los baños de proceso, es conveniente plantearse si la composición o concentración de cada baño puede ser modificada de manera que las corrientes residuales generadas decrezcan y, además, la calidad de las piezas obtenidas sea, como mínimo, igual a la que ofrece el baño sustituido.
- Limpieza de las piezas justo antes de proceder a su galvanizado, para evitar que se ensucien en los períodos de almacenamiento.
- Optimizar la limpieza de las piezas a fin de reducir la generación de residuos y emisiones, utilizando la cantidad justa del producto de limpieza y prolongando al máximo la vida de los baños de preparación.
- Utilización de productos de limpieza menos contaminantes. En este sentido, el orden de elección del producto de limpieza es: aire, agua, medio abrasivo, disolución acuosa de detergentes, disoluciones alcalinas, ácidos y, finalmente, disolventes.
- Agitación de los baños para aumentar la eficacia de las operaciones de limpieza, bien sea por medios mecánicos o ultrasónicos.
- Extracción lenta de las piezas de los tanques de preparación y de los de proceso, dando tiempo a un drenaje del líquido en exceso hacia el tanque.
- Correcta colocación de las piezas en los bastidores, para minimizar el arrastre de materias primas.
- Maximizar, tanto como sea posible, el tiempo de enjuagado de las piezas. Éste es un punto importante que, a menudo, se olvida. Recomendamos un tiempo de enjuagado mínimo de 10 segundos para bastidores.
- Asegurar el vaciado de las piezas durante el tiempo de enjuagado. Si se estima conveniente, es preciso realizar diferentes movimientos vibratorios con los bastidores, recién sacados de los baños, para facilitar el vaciado del líquido que puedan haber retenido las piezas.
- Instalación de tapajuntas para recoger el líquido que gotea en las piezas al extraerlas de los tanques correspondientes.

- En la recuperación de piezas defectuosas deberán aplicarse, en primer lugar, sistemas mecánicos de limpieza, antes de proceder a los sistemas líquidos.
- Llevar un control normalizado del estado de las piezas después del proceso de limpieza y preparación, a fin de reducir el número de piezas defectuosas que se galvanizan.
- En cuanto a los trabajadores, informarles sobre la importancia de reducir la contaminación ambiental y la necesidad de utilizar los sistemas de protección personal idóneos: uso de mascarillas, cascos o tapones auditivos, gafas y guantes.
- Formación profesional adecuada de los operarios encargados de las líneas productivas, para llevar a cabo una operación con conocimiento profesional.
- Dejar enjuagar bien los botes y bidones de productos.
- Conocer la composición de los productos que se utilizan en la empresa y los posibles componentes nocivos. En este sentido, es muy importante solicitar y mantener actualizadas las hojas de seguridad de los productos.
- Calcular bien la cantidad de materia prima necesaria para cada tarea y procurar programar los cambios a fin de reducir al mínimo las limpiezas y los restos de materias.
- Estudiar el diseño de las conexiones de tubos, bombas y depósitos de la instalación para que la parte que hay que enjuagar y limpiar sea mínima.
- No mezclar productos que no se correspondan.
- Evitar vertidos y salpicaduras.
- Controlar periódicamente que los grifos y las conexiones no gotean.
- Conocer el correcto funcionamiento de la maquinaria y equipos utilizados. Cuanto mejor se conozca, mayor rendimiento se obtendrá del equipo y menos posibilidades de contaminación se producirán.
- Observar que las superficies a tratar electrolíticamente se hallan en perfecto estado y no presentan irregularidades que puedan afectar a la calidad final del tratamiento.

- Mantenimiento y conservación de instalaciones y equipos

El funcionamiento normal de los equipos y máquinas provoca su desgaste y afecta a su rendimiento, lo que comporta la generación de productos fuera de especificaciones, fugas, vertidos, etc. Todo esto puede generar unas corrientes residuales nada menospreciables.

El mantenimiento preventivo consiste en la inspección y limpieza periódicas de los equipos e instalaciones, incluyendo la lubricación, comprobación y sustitución de las piezas en mal estado, constituyendo en sí misma una buena práctica para la prevención en origen de la contaminación. En términos generales, se puede reducir la cantidad de residuos y emisiones generados a causa de fugas y productos fuera de especificación, aumentar la vida útil de los equipos y mejorar la productividad de la empresa.

Entre las principales buenas prácticas que contribuyen a la correcta conservación de las instalaciones y minimización de residuos, tenemos:

- Elaborar hojas o procedimientos de mantenimiento para cada equipo o máquina, con las instrucciones de uso. Es importante que se encuentren cerca de cada equipo y que detallen sus características, funcionamiento óptimo y mantenimiento adecuado. Además, es preciso que cada hoja incluya la frecuencia y el método de limpieza del equipo, la realización de pequeños ajustes, lubricación, comprobación del equipo y reemplazo de pequeñas piezas. También es conveniente que recojan un registro escrito de las averías sufridas, cambios de piezas, ajustes realizados, fechas de las revisiones y de las reparaciones, etc. Será preciso indicar, por otra parte, dónde depositar las piezas usadas y los posibles residuos generados –aceites, piezas metálicas, trapos sucios, etc.– Estas hojas pueden ser en forma de tarjetas de datos o informatizadas.
- Elaborar, asimismo, hojas de incidencias para cada línea o área de producción, donde el personal anote las averías, los goteos de válvulas o de juntas, paradas de los equipos, etc., que puedan afectar a la fabricación o provocar una generación innecesaria de corrientes residuales.
- Es fundamental informar y formar al personal encargado del mantenimiento, para que se ajuste a los procedimientos escritos y respete la periodicidad establecida para las revisiones. Este aspecto es especialmente esencial también en cuanto a la gestión de los residuos que se generen como consecuencia de las operaciones de mantenimiento (líquidos de limpieza sucios, serrín sucio, trapos sucios, etc.). Es importante, en este caso, no mezclarlos y acumularlos en el lugar reservado a tal efecto.
- Para determinados elementos y equipos (aparatos de combustión, toros, por ejemplo), es preferible subcontratar el mantenimiento preventivo de forma externa, a una empresa especializada.

- Limpieza de equipos e instalaciones

Como ya se ha ido indicando anteriormente, existen diversos medios para evitar los vertidos accidentales y las fugas, para llevar a cabo la manipulación correcta de los productos y la utilización de los elementos adecuados para los trasvases, etc. Pero, a pesar de todas las medidas de prevención citadas, una parte no deseada de los materiales siempre llega a ensuciar los equipos y las instalaciones de la empresa.

Al producirse la necesidad de limpiar, la secuencia de actuaciones recomendable es: aislar el producto vertido, a fin de evitar su propagación, recogerlo, de manera que se pueda reutilizar o reducir su volumen y, finalmente, limpiar el suelo o lo que se haya ensuciado. Esta secuencia

posibilitará el ahorro en detergentes de limpieza y agua, permitirá reducir la carga contaminante de las aguas residuales vertidas y, en caso de no ser factible la reutilización del producto, facilitará su segregación y su gestión como residuo.

Como normas generales, en la limpieza de equipos e instalaciones, se recomienda a la empresa lo siguiente:

1. Informar, formar, concienciar y supervisar al personal encargado de limpiar.
2. Sustituir los sistemas manuales por sistemas automáticos, más eficientes.
3. Establecer procedimientos escritos de limpieza.

Concretamente, algunas buenas prácticas recomendables en este apartado son las que se citan a continuación:

- Establecer y dar a conocer procedimientos escritos que describan, en función del producto vertido, las acciones a llevar a cabo, el orden en que se han de realizar y los materiales a utilizar. Se trata de conseguir la máxima eficiencia en la limpieza con el mínimo de recursos y reducir al mínimo posible el número de operaciones de limpieza, evitando cualquier limpieza innecesaria.
- El primer objetivo será, como ya se ha mencionado, siempre que sea posible, el aislamiento del foco como primer paso y, a continuación, recoger el material vertido de forma que se permita su reutilización. En el caso de líquidos, es importante construir sistemas de retención en las zonas de trasvase y almacenamiento que no han de estar conectados a alcantarillado o redes de drenaje internas. Para los sólidos, es suficiente con evitar el contacto del sólido con el agua u otros productos que provoquen su propagación.
- Disponer del material adecuado para aislar los distintos tipos de productos que se suelen manipular en la empresa y que pueden ser vertidos accidentalmente, como por ejemplo las bandejas o recipientes para colocar debajo del bidón y que actúen como sistemas de retención para recoger el líquido que pueda caer.
- Disponer del material adecuado para limpiar el suelo o el emplazamiento afectado por una fuga o un vertido, una vez aislado el foco y recogido el producto vertido. Este material tendrá que ser fácilmente accesible para el personal y de ahí que deba ubicarse cerca de los puntos donde puede ser más necesario. Siempre que sea posible, deberá utilizarse la limpieza mecánica en lugar de la química.
- Proceder a la limpieza de los equipos de proceso (filtros, cubas, bombas, etc.) de forma periódica, con objeto de mantenerlos en correctas condiciones y, al mismo tiempo, facilitar su limpieza.

- Para la limpieza de equipos, procurar utilizar el sistema de limpieza en cascada, o a contracorriente: emplear, para la primera limpieza, el líquido procedente de otras limpiezas, siguiendo a continuación con otro medianamente sucio y finalizando la operación con la menor cantidad posible de líquido de limpieza limpio.
- En caso de requerir métodos de limpieza química (como, por ejemplo, la limpieza del suelo con agua y una solución desengrasante), los parámetros de control a tener en cuenta son el tiempo, la temperatura, la concentración y la turbulencia necesarios para una operación eficaz. Para reducir la cantidad de disolución de limpieza se precisa, por este orden:
 - limpiar con métodos mecánicos o no químicos en el momento y lugar adecuados, como es el caso de las azuelas, cepillos, aspiración, etc.
 - utilizar mangas o aerosoles a presión, lo que permite el ahorro de agua y/o productos de limpieza (agua, vapor de agua),
 - emplear agua con tensoactivos u otros productos, (tales como agentes de suspensión y emulsionantes),
 - reutilizar el agua con detergentes de una limpieza anterior, para efectuar un primer lavado, consiguiendo una concentración de los contaminantes y un menor volumen de agua sucia de limpieza.

- Desarrollo y cumplimiento de los procedimientos de operación

La existencia de documentos o procedimientos de operación escritos que recojan todos los datos, operaciones e instrucciones efectuados en los distintos procesos llevados a cabo aseguran que cada tarea quede bien definida y, además de mejorar la eficiencia en la producción, pueden reducir la generación de corrientes residuales. De no ser así, nos podemos encontrar con un despilfarro de materias primas, procesos ineficientes, etc. que, en conjunto, contribuirán a una mayor generación de residuos y a aumentar el riesgo de accidentes.

En concreto en este apartado, es necesaria la implicación de todos los niveles operativos, cada uno de ellos en su parcela de responsabilidad, en la elaboración e implantación de estos procedimientos de actuación.

Como recomendaciones concretas, podemos apuntar las siguientes:

- En primer lugar, seleccionar los procedimientos normales de operación de los procesos realizados con mayor frecuencia en la fábrica. Será preciso detallar más aquellas operaciones que pueden tener una mayor repercusión ambiental como, por ejemplo, para el caso que nos ocupa:

- procesos de fabricación,
- operaciones de mantenimiento,
- limpieza de equipos e instalaciones,
- almacenamiento y trasvase de materiales,
- actuación ante las fugas o vertidos.

Es importante que cada procedimiento incorpore la descripción global de los procesos y que defina cada uno de los trabajos individuales, indicando las tareas que realizará cada operario o responsable, el método de actuación, los medios previstos, etc.

- Hacer respetar el contenido de los procedimientos elaborados, evitando improvisaciones u omisiones de las instrucciones establecidas.
- En el caso de fugas o vertidos sería necesario disponer, como ya se ha dicho anteriormente, de un procedimiento genérico donde se describan las primeras actuaciones que hay que llevar a cabo, indicando que es preciso avisar a los responsables.
- Mantener un registro de datos sobre la generación de corrientes residuales para cada línea de proceso o área de la empresa, así como sobre los costes asociados. El objetivo consiste en identificar las áreas que requieren, con mayor necesidad, una mejora y, posteriormente, servirá para evaluar los resultados de las prácticas mejoradas.

- Segregación de los residuos

La correcta segregación de los distintos tipos de corrientes residuales generadas por la empresa posibilita la minimización, lo que permite conferir la gestión más adecuada a cada tipo de residuo e incrementar su potencial de reciclaje y recuperación, con el consiguiente ahorro económico asociado al tratamiento. Por contra, la mezcla de los diferentes tipos de residuos provoca el despilfarro de materias primas al reducir la posibilidad de reutilización, aumenta la contaminación entre los residuos y, en definitiva, incrementa los costes de gestión.

Es necesario, por lo tanto, separar en la empresa los residuos que se generan de acuerdo con sus características. En concreto, se puede recomendar:

- Dotar de medios e instrucciones por escrito de forma que se puedan segregar los residuos generados, de acuerdo con los siguientes aspectos:
 - separar los residuos según sus características fisicoquímicas: aislar los residuos líquidos de los sólidos, separar los residuos especiales de los no especiales y de los inertes, así como segregar los residuos tóxicos según el tipo de sus componentes mayoritarios. Es interesante

segregar por tipos los residuos inertes o los banales, de forma que se posibilite también su valorización externa (madera, cartón, chatarra según su composición, plástico, etc.).

- Esta segregación presupone disponer de contenedores específicos que, además, sería interesante ubicar cerca de cada área de trabajo, tanto en fábrica como en las oficinas, almacenes o patio exterior de la empresa.
- Como ya se ha indicado en el capítulo correspondiente al almacén, hay que prever y adecuar (pavimentar, cubrir, etc.) y señalizar la zona donde se almacenarán los diferentes contenedores hasta que sean retirados por un gestor autorizado. Es preciso señalizar también cada contenedor adecuadamente, con indicación del residuo, código, condiciones de almacenamiento y manipulación, nombre y teléfono del gestor, etc., tal y como ya se ha visto anteriormente.
- Nombrar a responsables que se encarguen del correcto uso de cada contenedor y zona de almacenamiento, y que avisen a los gestores de cada tipo de residuo para vaciar o sustituir el contenedor cuando éste esté lleno.
- Favorecer la reutilización del material de embalaje, bien sea en la propia empresa o mediante su devolución al proveedor.
- Informar, formar e incentivar al personal de la empresa sobre la necesidad de segregar los residuos.

3.2 Reciclaje en origen

Como hemos ido viendo a lo largo del presente estudio, la industria galvánica produce un consumo de materias primas importante. Por otra parte, se trata en general de productos potencialmente contaminantes. Existen diversas técnicas para reducir las pérdidas, recuperando y/o valorizando estas materias y evitando su transformación en residuos.

Veremos, a continuación, una serie de medidas sencillas en la utilización de productos, y otras más elaboradas que implican inversiones más o menos costosas.

3.2.1. Recuperación de las materias primas

3.2.1.1. Desengrase

A medida que se elimina el aceite y la grasa de las piezas a tratar, el desengrase se va cargando de aceites, grasas e impurezas de las piezas.

En general, se observa que estos baños de preparación son eliminados, de manera periódica, cuando han perdido su poder desengrasante como consecuencia de estas impurezas.

Como alternativa técnica (económicamente viable) a este modo de proceder se recomienda la implantación de unos equipos que separen las impurezas de la solución desengrasante. Estos equipos permiten la recuperación del producto y la eliminación de las grasas y aceites.

Dentro de esta alternativa, disponemos de diversos sistemas para implantar en las empresas:

* Cuando el desengrase forma una *emulsión*:

- **Ultrafiltración:** Separa los aceites y recicla los productos activos y disolventes de los procesos de desengrase. En este proceso, es preciso que los distintos componentes tengan un peso molecular inferior al valor umbral de corte de la membrana considerada. La eficacia es bastante buena, aunque el coste de inversión inicial puede ser importante.

* Para aceites *no emulsionados*:

- **Sistema de barrido superficial por flotación y decantación y “oil skimmer”:** consiste en la instalación de una bomba en el baño de desengrase que vaya insuflando aire sobre su superficie y vaya desplazando los aceites y grasas sobrenadantes hacia un departamento de concentración. Este sistema sólo es útil en el caso de aceites no emulsionados en el desengrase. Se trata, en general, de un método con una eficacia mediocre, aunque su coste de implementación es relativamente bajo. Los aceites también se pueden eliminar utilizando equipos de arrastre mecánico.
- **Equipo de centrifugación:** provoca la separación de las dos fases, debido a que el peso de los aceites y grasas es superior al del producto desengrasante. La eficacia del sistema es lo suficientemente buena, aunque los costes de inversión y de operación son considerablemente elevados.
- Además de estas posibilidades, existe otra consistente en prolongar la vida útil del desengrase, mediante la **introducción de un predesengrase**. Cuando el predesengrase se tiene que vaciar, se renueva con el contenido del baño de desengrase. Este último es formulado de nuevo. Con esta medida, se consigue prolongar la vida del baño en un 20-30%.

- Finalmente, otra alternativa sencilla para recuperar producto, en el caso de desengrases que trabajan a cierta temperatura ($>40^{\circ}\text{C}$), consiste en la **introducción de un lavado estanco de recuperación** que permita recuperar las pérdidas por evaporación. Por ejemplo, un desengrase acuoso alcalino que trabaje a unos 70°C , tiene unas pérdidas por evaporación comprendidas entre 6,5 y 31 l/h/m².

3.2.1.2. Decapado

Uno de los principales problemas que comporta el proceso de decapado químico es el ataque del ácido por encima de la propia superficie del metal de base. Este hecho provoca dos efectos:

- envejecimiento prematuro del baño de decapado por contaminación metálica;
- como consecuencia de lo anterior, vaciado más frecuente del baño con el consiguiente incremento de consumo de materias primas y de generación de corrientes residuales.

Es necesario, por lo tanto, poder incidir sobre la velocidad de ataque del ácido sobre el metal de base, controlando el proceso.

En lo que respecta al hierro, los parámetros de funcionamiento en medio de ácido sulfúrico y clorhídrico, son:

- la concentración del ácido;
 - la temperatura del baño⁹;
 - la concentración en hierro disuelto¹⁰.
- Un sistema para reducir el ataque en las zonas oxidadas del metal de base, consiste en la introducción en el baño de algún tipo de **inhibidor de ataque**. Dada la gran variedad de inhibidores de ataque disponibles en el mercado (aminas orgánicas, etc.), es recomendable escogerlos teniendo en cuenta su compatibilidad con las operaciones siguientes de tratamiento.
 - Existe asimismo la posibilidad de purificar los baños de decapado, ya sea por cargas como en continuo. En el caso del decapado de hierro con ácido sulfúrico, podemos utilizar el sistema denominado **electro-electrodiálisis**. El método consiste en

⁹ La velocidad de decapado con ácido sulfúrico se incrementa notablemente con la temperatura.

¹⁰ En el caso del decapado con ácido clorhídrico, la velocidad de decapado aumenta sensiblemente con la presencia de Fe^{2+} en disolución.

concentrar el ácido sulfúrico por migración de iones a través de una membrana bajo el efecto de un campo eléctrico y eliminación del hierro por deposición sobre el cátodo. Para más información, ver el punto 3.2.3.3. Electro-electrodiálisis, más adelante en este mismo estudio.

- En el caso del baño de decapado con ácido clorhídrico se puede utilizar un equipo de **resinas de intercambio iónico** de tipo aniónico que fijarán el cloruro de hierro formado en el baño. Posteriormente, se procede a la regeneración con agua de la resina, obteniéndose ácido clorhídrico puro. Ver también el apartado 3.2.3.7. Intercambio iónico, en este mismo estudio.
- Para los baños de decapado de cobre con ácido sulfúrico, se puede utilizar una unidad de **electrólisis en continuo** sobre el baño, la cual permite la obtención del cobre metálico directamente en el cátodo.

Otros sistemas más sencillos a considerar son:

- **Introducción de un predecapado** antes del decapado (como en el caso del desengrase), que sea alimentado por los vaciados del baño de decapado.
- También en este caso, para decapados en caliente (por ejemplo, de hierro y cobre con ácido sulfúrico), es interesante **introducir un lavado estanco de recuperación**, que permita recuperar las pérdidas por evaporación del baño recuperando el ácido. Además, este lavado de recuperación puede servir para **reformular un nuevo decapado**, cuando el primero se tiene que sustituir. En muchas ocasiones, sin embargo, se debe proceder a depurar en continuo el baño, ya que se va concentrando en metal de base.
- Para acabar este apartado, hay que recomendar la introducción de un **predecapado mecánico**, siempre y cuando la pieza lo permita, con lo que se podrá reducir –o, a veces, suprimir– la utilización de agentes químicos.

En el caso de grandes cantidades de decapado por regenerar, apuntamos tres alternativas técnicamente viables, pero de elevado coste de inversión:

- Instalación de un **crystalizador de sulfato de hierro**: el mecanismo consiste en dejar enfriar el decapado dentro del cristalizador, hasta una temperatura tal que se provoca la precipitación del hierro en forma de sulfato heptahidratado; una variante al sistema consiste en calentarlo, para obtener la forma monohidratada del sulfato de hierro. Con

este sistema se consigue entre un 40 y un 70% de eliminación del sulfato de hierro, con una reducción de entre 30-50% en consumo de ácido nuevo. Este producto obtenido puede intentar valorizarse, por ejemplo, como coagulante en procesos de depuración fisicoquímica del agua residual. Coste de la inversión muy elevado, sólo recomendable para grandes volúmenes de recuperación (500 l/h o más).

- Sistema de **incineración oxidativa**, consistente en pulverizar el decapado dentro de un horno a alta temperatura, con lo cual se obtiene la recuperación de HCl en forma gaseosa y de Fe₂O₃. El sistema permite obtener un ácido recuperado concentrado que tiene menos de 10 g Fe /l. Se trata también de un sistema de coste muy elevado, factible sólo para grandes instalaciones de decapado (más de 1 m³/h).
- **Intercambio líquido-líquido**, consistente en la extracción de metales pesados en baños de decapado (Fe, Ni, Cr...) por la adición de tributilfosfato en queroseno. El sistema permite recuperar ácido nítrico y, hasta un 70% de ácido fluorhídrico. Al igual que los restantes tres sistemas, la inversión puede ser muy elevada, sólo justificable para grandes plantas de decapado.
- **Retardo iónico**. Consistente en la separación del metal disuelto en el ácido, permite recuperar el ácido en un grado de pureza suficiente para ser reutilizado en el proceso.

3.2.1.3. Productos de aporte

Consideramos, en este apartado, todos aquellos productos que constituyen los diversos baños de proceso (desengrases, decapados, aditivos, sales metálicas, etc.).

Se debe partir de la idea de que buena parte de las pérdidas de productos se puede evitar, fundamentalmente por dos vías:

- prevención de las pérdidas, evitando que se produzcan o reduciéndolas:
 - elección del baño (naturaleza, composición, concentración, etc.)
 - gestión del baño correcta (respetando las condiciones de trabajo óptimas, elección de las mínimas concentraciones, mantenimiento de baños, etc.).
- recuperación y valorización de las pérdidas: mediante la introducción de equipos específicos:
 - sistemas que permiten recuperar todas las sales del baño:
 - ósmosis inversa: baños de níquel
 - electrodiálisis: baños de níquel, cobre y plata
 - electro-electrodiálisis: baños de estaño y de cromo, purificación de ciertos decapados (por ejemplo, de ácido sulfúrico)

- evaporación: baños de cromo, cadmio, cinc y plata
- ultrafiltración: purificación de desengrases
- retardo iónico: recuperación de ácidos del decapado o anodizado
- sistemas que permiten recuperar metales sin el resto de constituyentes:
- electrólisis: todos los metales
- resinas de intercambio iónico específicas: plata, oro, cobre, boro, etc.

3.2.2 Reutilización del agua

3.2.2.1 Técnica de skip

Uno de los sistemas que se puede emplear para disminuir el consumo de agua es la técnica de skip.

Esta técnica consiste en emplear un mismo lavado para diferentes etapas que químicamente sean compatibles, como por ejemplo, emplear el enjuague posterior a una etapa de decapado como lavado previo a un baño ácido o bien emplear las aguas de lavado de un decapado (ligeramente ácidas) como aguas de lavado del desengrase. Con este hecho, se consigue reducir el número de cubas de lavados y el consumo de agua.

Para poder aplicar esta técnica de un modo coherente, es necesario plantearse el hecho de que las etapas que comparten enjuagues han de estar lo más cercanas posible y situadas de manera que los arrastres puedan ser también minimizados; en caso contrario, el efecto perseguido por la técnica queda devaluado por el aumento de los arrastres.

3.2.2.2. Reciclaje por intercambio iónico

Los sistemas de reciclaje por intercambio iónico van ganando popularidad, especialmente en las industrias que deciden instalar plantas de depuración de efluentes.

El sistema es muy útil porque consigue algunos objetivos muy importantes:

- reducir el consumo de agua de la red en un alto porcentaje;
- limpiar las piezas con un caudal importante de agua que, además, es un circuito cerrado y no se pierde;
- limpiar las piezas con agua de muy buena calidad. (Estos equipos eliminan la práctica totalidad de los iones del agua, transformándola en desmineralizada);

- evitar al máximo posible las contaminaciones de los baños debidas al arrastre de las piezas;
- depurar un volumen de efluentes mucho menor y más concentrado, aumentando la eficacia de los tratamientos de depuración y reduciendo su coste de operación;
- reducir el coste de inversión en instalaciones de tratamiento de efluentes.

La aplicación de sistemas de reciclaje de aguas mediante resinas de intercambio iónico deberá ser estudiada con mucho detenimiento en función de las especies químicas presentes en los efluentes y su grado de concentración.

La presencia de determinadas sustancias puede afectar a los sistemas de reciclaje, ya que pueden bloquear los grupos activos de las resinas y, por lo tanto, inutilizar los equipos. También es muy común que especies tóxicas incompatibles sean retenidas y concentradas conjuntamente. Éste puede ser el caso de agua con presencia de cromados y también cianuros. Dado que ambas especies son aniónicas, son retenidas en la misma resina, la aniónica, de forma que, al regenerarse las resinas, ambos contaminantes estarán presentes conjuntamente.

Si se produce este hecho, la depuración de los contaminantes no puede realizarse por métodos usuales y se complica de forma importante. Por consiguiente, es necesario que **nunca se mezclen aguas que contienen cromados y cianuros**.

Otra dificultad típica puede ser la mezcla de efluentes con presencia del níquel como catión, con iones de cianuro libres. En estas condiciones, se puede producir la formación de complejos como el níquel tetracianuro, muy difícil de destruir por los métodos tradicionales y, en consecuencia, escapan de los sistemas de depuración que se tienen en cuenta. Es necesario, por lo tanto, prever esta situación para evitar la formación del complejo anterior.

El segundo gran problema asociado al reciclaje del agua utilizando resinas de intercambio iónico está relacionado con la concentración máxima de contaminantes presentes en las aguas a recircular.

Los equipos industriales de reciclaje tienen definida una capacidad máxima fija. Si la concentración de sales en el agua recirculada es alta, esta capacidad se agota en intervalos de tiempo muy cortos, obligando a regenerar los equipos con frecuencia. Este efecto está relacionado tanto con el coste de la explotación del sistema de reciclaje como con la generación de efluentes de alta salinidad.

La concentración máxima de sales en el agua reciclada será un parámetro muy importante a tener en cuenta para conseguir una buena aplicación de un reciclaje.

En la mayoría de casos, esto obliga a una remodelación de las líneas de trabajo, de forma que se interpongan siempre como mínimo dos enjuagues consecutivos después de cada proceso de tratamiento. El primero trabajará con un caudal elevado, recirculando por el interior del equipo de reciclaje.

El problema final de los sistemas de reciclaje, aún estando bien diseñados, es el aumento de la salinidad (o conductividad) de los efluentes evacuados. Este problema es de difícil solución ya que, por un lado, se disminuye el consumo de agua y, por lo tanto, aumenta la concentración de sus contaminantes, obligando a una depuración, que pasa a ser más efectiva, y se traduce en un incremento de la salinidad. Por otro lado, los equipos de reciclaje se regeneran mediante ácido (comúnmente clorhídrico), un álcali (comúnmente sosa), en cantidades variables pero que, como promedio, se sitúan en 100 g de ácido clorhídrico al 100%, por litro de la resina catiónica y 80 g de hidróxido sódico al 100% por litro de resina aniónica.

Esto supone, en la práctica, conductividades muy altas en los efluentes de regeneración, debidas a la presencia de sodio y cloruros, especies, ambas, de muy difícil eliminación. Este aumento de la salinidad del agua puede causar, en determinadas zonas, importantes modificaciones en el ecosistema.

3.2.2.3 Reciclaje por ósmosis inversa

Este sistema de reciclaje es una alternativa a los intercambiadores de iones, para el reciclaje de las aguas de lavado. Su nivel de implantación actual es bajo, aunque técnicamente es factible.

El funcionamiento de la ósmosis inversa se basa en la separación de las sales disueltas del disolvente, en este caso el agua, mediante una presión externa que obliga al disolvente a atravesar una membrana osmótica que no permite el paso de los iones salinos.

De este modo, a partir de un caudal con una concentración determinada en sales, se obtienen dos soluciones diferentes. Una con presencia mayoritaria de disolvente, denominada permeato, de gran volumen y poca concentración salina, y otra, denominada concentrado, de poco volumen y con una alta concentración salina. Así, es posible reciclar el permeato para operaciones de enjuague.

La separación se produce por efecto mecánico, aplicando una presión y, por lo tanto, no existe adición alguna de productos químicos para la separación de la contaminación (al contrario que con los intercambiadores de iones). De este modo, no se incrementa el contenido salino de los efluentes contaminados, controlándose el efecto de la conductividad elevada.

Otra ventaja de la ósmosis inversa es su capacidad de trabajo sobre efluentes más concentrados que el intercambio iónico, de forma que no será necesario realizar diluciones antes de enjuagar con el agua recirculada. Por contra, la calidad del agua recirculada no llega a presentar las características de pureza de los sistemas de resinas, por lo que en algunos casos éstos aún serían necesarios.

Así y todo, este tipo de equipos presenta algunos problemas prácticos operativos que dificultan su aplicación a nivel industrial. Las membranas utilizadas hasta la actualidad han mejorado mucho sus prestaciones, pero siguen presentando problemas de resistencia química frente a los agentes agresivos, como hexavalente, cloro, persulfato, etc. especialmente a partir de ciertas concentraciones.

Además, existen problemas importantes de saturación de estas membranas que se deberán prevenir mediante combinaciones de filtros de arena previos y filtros finalizadores hasta un tamaño de paso de 5 micras. Esta filtración es necesaria también para eliminar materias orgánicas que podrían dañar las membranas, e incluso en algunos casos sería recomendable la instalación de lechos filtrantes de carbón activo.

Otro problema asociado es la presencia en el agua de cationes que producen incrustaciones, como el calcio o el manganeso. Es indispensable, por lo tanto, que todo el agua que penetre en el sistema esté desendurecida mediante un descalcificador.

Como puede observarse, el sistema final es bastante complejo ante las ventajas que proporciona, lo que implica un coste de instalación bastante más elevado que los sistemas de reciclaje por resinas de intercambio iónico. En cambio, a nivel operativo, el coste es bastante inferior, ya que no exige consumo elevado de productos químicos.

3.2.3 Recuperación de los arrastres

A pesar de todo el conjunto de medidas aportadas para reducir el arrastre (ver el apartado 3.1.2.2. Reducción de los arrastres), subsiste un arrastre residual inevitable que acaba, en el peor de los casos, en el suelo de la nave o en las cubas de lavado con agua. Como ya se ha visto anteriormente, este arrastre puede ser recuperado, en parte, por la mejora de la estructura de lavados (ver también 3.1.2.3. Mejoras en los enjuagues y lavados).

No obstante, existen otros sistemas más sofisticados que también permiten recuperar buena parte del arrastre producido. Veamos cuáles son:

3.2.3.1. Electrolisis

Este sistema permite recuperar un metal que se encuentra en una solución. Esta separación se efectúa dentro de una celda electrolítica con la deposición del metal en cuestión en el cátodo de la misma. En el apartado 3.2.1.2. Recuperación de materias primas: decapado, ya se han apuntado algunos ejemplos de recuperación.

El funcionamiento del sistema es idéntico al de cualquier otra celda electrolítica, por lo que se tendrá que proceder:

- controlando la concentración del baño,
- controlando periódicamente los equipos eléctricos
- reemplazando los cátodos.

Aparte del metal recuperado, el resto de sales y compuestos del baño no son recuperables. La recuperación del metal depositado en los cátodos requiere la destrucción de éstos, normalmente mediante incineración y, por lo tanto, se deberá disponer del servicio de un recuperador, normalmente externo, cuyo coste es preciso añadir al coste total de la recuperación.

Además, hay que indicar que el consumo eléctrico es importante en relación con las cantidades recuperadas, por lo tanto, se utiliza para recuperar metales preciosos, cuyo valor compensa los gastos de la recuperación.

3.2.3.2. Electrodiálisis

También consiste en un sistema electroquímico que permite extraer los iones contenidos en una solución, por migración a través de membranas selectivas, bajo la influencia de un campo eléctrico. Normalmente, una célula de electrodiálisis está formada por una membrana catiónica que delimita dos compartimentos entre dos membranas aniónicas. Dentro de uno de los compartimentos circula la solución a diluir (lavado) y, en el otro, la solución a enriquecer (baño). Las membranas aniónicas sólo dejan pasar los aniones y las catiónicas, los cationes. Tanto las unas como las otras son impermeables a los líquidos. Los cationes migran en el sentido de la corriente eléctrica, del ánodo hacia el cátodo, atravesando la membrana catiónica y quedando retenidos por la aniónica.

De esta forma, se consigue concentrar los electrolitos disueltos en un lado y no en el otro; tanto es así, que permite:

- separar ciertos iones de una solución
- concentrar una solución que puede devolverse hacia el baño de proceso.

Por lo tanto, se trata de un sistema de recuperación de sales en baños calientes, donde tiene lugar una evaporación natural. En este sentido, su colocación se realiza entre el baño de proceso y el lavado estanco de recuperación, concentrando las sales arrastradas hacia este lavado y devolviéndolas al baño. De este modo, se consiguen dos objetivos:

- devolver al baño parte de las sales perdidas por arrastre,
- mantener el lavado estanco de recuperación a una baja concentración, con lo cual se contaminan menos las aguas de lavado siguientes, pudiéndose reducir el caudal de agua.

Este tipo de instalación es útil para enjuagues estancos de cobre, níquel y plata.

Como inconvenientes del sistema, cabe citar:

- controles y mantenimientos diarios del equipo: control de la presión de trabajo, verificación de los filtros y de los electrodos;
- descarbonatación de las membranas: trimestralmente.

Dado que su rendimiento es muy alto, entre un 95-97%, y que los costes operativos y de mantenimiento no son muy elevados, se estima un período medio de devolución de la inversión inferior a un año.

3.2.3.3. Electro-electrodialisis

Este sistema combina los efectos de la electrólisis con los de la electrodiálisis, interponiendo una membrana de electrodiálisis (anódica o catódica) entre dos electrodos. Dos compartimentos, uno anódico y el otro catódico, son de este modo separados entre ellos. El compartimento anódico está limitado por un ánodo y la membrana, mientras que el compartimento catódico está limitado por la misma membrana y un cátodo. La elección del tipo de membrana depende de los elementos que se desee pasar de un compartimento a otro. Es decir, obtenemos una filtración selectiva de aniones y cationes.

El otro fenómeno que tiene lugar es el electrolítico: la oxidación en el ánodo y su reducción del elemento en el cátodo.

Como aplicación técnicamente viable, encontramos la regeneración del ácido crómico y del ácido sulfúrico en una cuba de lavado estanco. El ácido crómico se recupera en el compartimento anódico del aparato y puede ser reintroducido, ya sea en el propio baño de proceso o bien en el lavado anterior al baño, a fin de irlo reintroduciendo lentamente con el arrastre.

Como factor limitante del sistema, podemos indicar que la concentración máxima de trabajo en ácido crómico es de 300 g/l.

Otros inconvenientes del sistema los encontramos en los métodos de mantenimiento y control, que son muy similares a los de la electrodiálisis. Además, ya que el equipo produce soluciones directamente utilizables, pueden darse casos de contaminación de la solución por las impurezas que haya y que también se reducen en el cátodo.

El principal coste operativo es el energético, ya que nos encontramos con consumos de entre 25 y 30 kWh por kg de ácido crómico recuperado. Entre el elevado coste inicial de la inversión, los costes operativos y el precio de mercado del ácido crómico, los datos indican que el sistema sólo es interesante para instalaciones que tienen que recuperar grandes cantidades de ácido crómico.

3.2.3.4. Ósmosis inversa.

En el apartado 3.2.2.3. Reciclaje por ósmosis inversa ya se ha descrito ampliamente el sistema y su uso principal como elemento de recuperación de aguas. En este apartado, añadiremos sólo su posible uso como recuperador de materias procedentes de los arrastres existentes entre cubas.

En el caso de recuperación de sales, los iones metálicos están bien retenidos por las membranas de ósmosis, obteniéndose unos porcentajes de eficacia próximos, en muchos casos, al 90%.

Un sistema utilizado es la recuperación de las sales de níquel, contenidas en un lavado estanco de recuperación. En cambio, la recuperación de los abrillantadores del baño es menos importante que la del níquel, llegando a valores sólo del 60%. Por este hecho, se precisa una analítica y reformulación del baño para alcanzar los parámetros óptimos de trabajo.

Otro inconveniente que presenta la instalación es que, a diferencia de otros sistemas de separación selectiva, en este caso también se concentran las impurezas que vaya captando el baño, con lo cual existe alto riesgo de contaminación del mismo, al ir concentrando todas las sales.

Se trata de equipos de precio elevado, que requieren instalaciones anexas para poder funcionar bien, con mantenimientos periódicos como la limpieza de las membranas con una solución de ácido cítrico o acético para eliminar posibles deposiciones calcáreas y carbonatadas. Todo esto, añadido al bajo precio de las sales que puede recuperarse, hace que los períodos de devolución sean, normalmente, muy dilatados.

3.2.3.5. Ultrafiltración

Este concepto ya se ha tratado en el apartado 3.2.1.1. Recuperación de las materias primas: desengrase. Aquí añadiremos que, al igual que en el caso de la ósmosis, el sistema funciona separando el soluto de la solución mediante el uso de membranas de filtración, gracias a una presión externa que se aplica al sistema. La diferencia importante radica en el hecho de que, en este caso, se usan membranas selectivas según lo que se desee filtrar. Es necesario, pues, determinar –habitualmente de forma empírica– el tipo de membrana y el tamaño del poro deseado.

Actualmente, nos encontramos con dos tipos de membranas disponibles:

- membranas orgánicas: acetato de celulosa, poliamida, etc.
- membranas minerales: la principal, de óxido de circonio.

Mientras que las primeras son menos costosas, tienen aplicaciones más limitadas; las minerales se pueden utilizar sobre líquidos a temperaturas altas (entre 50 y 120 °C) y con presencia de disolventes aromáticos o clorados, todos ellos factores que las orgánicas no soportan.

Como posibles aplicaciones dentro del sector de tratamientos de superficie, tenemos las siguientes:

- separación y concentración de efluentes de electroforesis, en el templado de metales;
- recuperación de sales en los baños de desengrase, mediante la separación de los aceites.

Por su parte, entre los principales inconvenientes del sistema, hallamos la necesidad de limpieza del módulo de ultrafiltración, mediante una solución de ácido láctico y de butilo-butano, con lavados sucesivos posteriores con agua desmineralizada.

Por otra parte, son equipos de precio elevado que no justifican económicamente la recuperación del desengrase. En determinados casos, no obstante, (situaciones de piezas muy cargadas de aceites que originan verdaderos problemas a la hora de depurar los baños de desengrase agotados) puede ser interesante su instalación.

La ventaja de esta técnica es que permite tener una calidad constante de desengrase, adecuada para procesos en los cuales el desengrase debe ser de alta calidad.

3.2.3.6. Evaporación

Se trata de un sistema de concentración de materias que utiliza energía en forma calorífica para evaporar la parte líquida, concentrando las sales que se encuentran disueltas.

Dado este factor de concentración en sales, puede utilizarse para reintroducirlas en el baño de proceso. Es un sistema especialmente adecuado en el caso de baños que trabajan a temperatura baja (< 40°C), en los que las pérdidas por evaporación natural no son lo suficientemente significativas como para poder introducir lavados estancos de recuperación.

Por su parte, el agua evaporada, una vez condensada, puede servir para alimentar el sistema de lavados de la línea de proceso.

El sistema de evaporación puede introducirse en la línea a distintos niveles:

- sobre un sistema de lavados múltiples en cascada a contracorriente
- a nivel del lavado estático posterior al baño de proceso
- incluso, sobre el propio baño de proceso, concentrándolo

Evidentemente, sólo en los dos primeros niveles podemos alcanzar una recuperación de los arrastres.

Para evitar, por una parte, un coste energético importante en el calentamiento hasta ebullición de la disolución, como también para evitar la degradación de ciertos constituyentes orgánicos presentes en los baños galvánicos, el sistema de evaporación más recomendable es al vacío. Con este sistema, fácilmente, se puede alcanzar un proceso de evaporación de una solución acuosa a tan sólo 30-40 °C.

Tenemos aplicaciones prácticas del sistema en los siguientes ejemplos:

- evaporación de aceites solubilizados
- recuperación de cinc (en este caso, dado que el baño de cincado se encuentra bastante caliente, al provocar el vacío de la solución ya se consigue hacer hervir la solución, sin necesidad de calentamiento adicional)

- concentración de un baño de cromado para permitir la introducción de lavados estáticos a continuación del baño
- últimamente se está observando la implantación de estos equipos para alcanzar “*vertidos cero*”, en materia de aguas residuales, combinados con equipos de reciclaje de agua por vía del intercambio iónico.

Por su parte, como única dificultad del sistema tenemos el elevado coste de inversión del aparato. En lo que respecta a los mantenimientos, se trata de equipos bastante robustos. El único elemento crítico que debe controlarse es la bomba de vacío que, dado su elevado coste, requiere una atención más detallada. En cuanto a la explotación del equipo es importante controlar las presiones y temperaturas de trabajo, el nivel de líquido evaporante y los caudales de condensación y destilación. Para el óptimo aprovechamiento de esta técnica es conveniente analizar y adecuar, en caso necesario, la línea galvánica para incluir enjuagues múltiples; es recomendable combinar esta tecnología con un equipo de resinas de intercambio iónico.

3.2.3.7. Intercambio iónico.

Este sistema se ha tratado ampliamente en el apartado 3.2.2.2. Reciclaje por intercambio iónico, referente a las aguas de proceso generadas.

En este punto añadiremos las diversas posibilidades para la recuperación de determinados iones que se pierden con el arrastre.

Además de las ya mencionadas aplicaciones para la recuperación en continuo de las aguas de enjuague, los equipos de resinas se pueden utilizar para las siguientes aplicaciones:

- Depuración de recuperaciones de baños de ácido crómico o de pasivaciones crómicas, mediante la retención en la resina de cationes indeseables: Cr^{3+} , Zn^{2+} , Cd^{2+} , Fe^{3+} , Cu^{2+} , etc. Al proceder a su descontaminación se posibilita su reintroducción en el baño, consiguiéndose la recuperación de los arrastres producidos.
- Recuperación de metales presentes en las aguas de lavado, mediante el uso de resinas de tipo aniónico (Ag^+ , ácido crómico,...).
- Regeneración de un decapado de ácido clorhídrico, mediante la eliminación de los iones Fe^{3+} . El clorhídrico se puede recuperar (sólo es preciso ajustar su concentración) y el cloruro férrico que se obtiene es valorizable, concentrándolo previamente.

En cuanto a los problemas e inconvenientes de la instalación, nos referimos de nuevo al apartado 3.2.2.2. Reciclaje por intercambio iónico de este estudio.

Podemos concluir este apartado, apuntando que los intercambiadores iónicos permiten concentrar y extraer contaminantes (iones específicos). A pesar de todo, el nivel de concentración al que pueden llegar no permite reintroducir directamente las sales recuperadas, teniendo que proceder a su mayor concentración. Este hecho hace que no se utilicen demasiado con esta finalidad. Son especialmente indicados, como ya se ha visto, para soluciones muy diluidas, como por ejemplo enjuagues que se deben recircular en la línea de lavados.

Finalmente, para acabar este apartado dedicado a la recuperación de los arrastres, detallar aquellos sistemas más sencillos, muchos de ellos ya comentados en apartados anteriores, que pueden combinarse con todos los demás sistemas de recuperación vistos hasta ahora.

3.2.3.8. Otras medidas

- Barras de soporte para los bastidores

Este sistema es de utilidad en instalaciones de tipo manual, en las que los operarios han de manipular bastidores de peso elevado que dificultan las operaciones de enjuagado.

La operación es ciertamente sencilla y, en cambio, por desgracia, no se lleva a cabo con demasiada frecuencia.

En realidad, sólo significa realizar algunas operaciones más de colgado de bastidores. Así, mientras un gancho enjuagado se traslada al siguiente proceso, un segundo gancho estará en posición de enjuagado, y así sucesivamente.

Este sistema es de mucha utilidad sobre baños de trabajo a temperatura ambiente y en enjuagues de recuperación, pero no demasiado sobre baños de proceso en caliente, ya que la solución puede llegar a secarse sobre las piezas creando problemas de acabado final. En estos casos, su utilidad se limita a los enjuagues de recuperación.

- Tapajuntas entre las distintas cubas de trabajo

Consiste en colocar una superficie inclinada entre dos cubas consecutivas en el proceso de producción.

En la práctica, este tipo de dispositivos casi no se utiliza, incluso entre las instalaciones automatizadas y, en cambio, su utilidad es incuestionable.

En las plantas de proceso manual, el uso de tapajuntas y una disposición adecuada del proceso permitirán recuperar una buena parte de los arrastres, al mismo tiempo que se evitará que estos vayan al suelo, generando otro problema de difícil solución.

- Tanques de enjuagado

Cuando el tipo de producción es tal que existe un enjuagado prolongado como, por ejemplo, en las producciones en tambor, es muy conveniente considerar el uso de un tanque de recogida de enjuagues.

Se trata de un tanque vacío donde el transportador se puede suspender por un tiempo, mientras las piezas se van enjuagando. Los tambores pueden rotar mientras se halla en esta posición, asegurando un enjuagado máximo. Cuando en el fondo de este tanque se acumula cierta cantidad de solución, se puede devolver por bombeo al tanque de tratamiento.

- Tanques de enjuagado por aspersión

Una variación de los tanques de enjuagado son los tanques de aspersión. En éstos, las piezas se mojan con una pequeña cantidad de agua en forma de finas gotas en aspersión, que forman como una niebla que condensa sobre las superficies de las piezas, provocando un enjuagado en el fondo del tanque. Este sistema no puede ser considerado un lavado, debido a la pequeña cantidad que se utiliza.

Gracias a la naturaleza vaporosa de esta niebla, se llega a las partes más inaccesibles de las piezas. La solución acumulada en el fondo del tanque es bastante concentrada y, por lo tanto, puede ser reutilizada en el propio tanque de tratamiento.

Este sistema es de poca utilidad para piezas con concavidades donde puede quedar retenida solución del arrastre.

- Enjuagues estancos de recuperación

Como ya hemos visto anteriormente, este sistema es idóneo para la recuperación de las materias primas integrantes de los baños de proceso, especialmente si operan en caliente.

Para algunos casos especiales de baños que operan a temperatura ambiente, se pueden implementar los sistemas de recuperación ECO.

4. ALTERNATIVAS DE TRATAMIENTO

Veremos a continuación diversas alternativas a este tratamiento, orientadas hacia la reducción de los residuos generados en el proceso –fundamentalmente, en forma de fangos con hidróxidos metálicos– así como hacia la minimización de la cantidad de sustancias presentes en las aguas depuradas.

Una buena alternativa al tratamiento pasa, indefectiblemente, por una **correcta segregación de estos efluentes** del resto. Sólo de esta forma podremos actuar consiguiendo una correcta precipitación de todos los metales.

4.1 Ruptura de complejos metálicos

Una vez segregado el efluente a tratar, como alternativas al proceso convencional y que consiguen separar el metal del complejo, posibilitando su posterior precipitación, encontramos, entre otras, las siguientes:

1. Tratamiento con **cloruro cálcico, peróxido de hidrógeno y ácido sulfúrico**. El sistema, además de romper el complejo, reduce el cobre a la forma cuprosa que precipita muy bien en medio alcalino.
2. Otra variante de lo anterior, más efectiva y de más reciente implantación, es la adición de sulfato ferroso, previo al tratamiento convencional. El **sulfato ferroso y el peróxido de hidrógeno, a pH 9**, también consiguen reducir el cobre a cuproso, al mismo tiempo que se ocupa el lugar en el complejo gracias a la presencia de iones ferrosos o férricos. Como principal inconveniente del método, tenemos el elevado consumo de sulfato ferroso y la gran cantidad de fangos que genera.
3. También existen alternativas en aplicaciones similares, que pasan por el uso de un **polisulfuro de sodio e hidrosulfuro de sodio**. Como ventaja respecto a las anteriores, está el hecho de que generan mucha menor cantidad de fango residual, pero, en contrapartida, presentan un riesgo de generación de sulfuro de hidrógeno gaseoso, altamente tóxico. Es preciso, en este caso, llevar a cabo un riguroso control de pH y tener una buena ventilación del local donde se aplican los compuestos.
4. Una alternativa a estos tratamientos, mucho más reciente y que aún hay que terminar de desarrollar, consiste en el uso de un **xantano insoluble de almidón (ISX)**. Un posible uso de esta molécula orgánica es la regeneración de resinas catiónicas de intercambio iónico, ya que libera iones magnesio que ocupan los lugares de los metales adsorbidos. Los tratamientos de depuración combinando este compuesto con otros de tipo sulfuroso pueden reducir notablemente la presencia de metales pesados en las aguas residuales. Como norma, los compuestos sulfurosos son mucho más insolubles que los formados con hidróxidos.

5. Finalmente, para la eliminación de metales complejados y otros componentes de difícil eliminación por vía fisicoquímica, cabe mencionar la posibilidad de utilización de **resinas de intercambio iónico específicas**. En este sentido, se dispone en el mercado de resinas quelantes para Cu, B, NO₃⁻, entre otras. Para evitar problemas con el eluato de regeneración, lo más aconsejable es regenerar la resina de forma centralizada, en plantas de tratamiento de residuos.

4.2 Oxidación de cianuros.

En lo que respecta a éste, las alternativas al hipoclorito en medio alcalino son las siguientes:

1. Oxidación de cianuros alternativa con **gas cloro**; esta posibilidad es especialmente adecuada en el caso de grandes estaciones de tratamiento de aguas a causa del menor coste operativo que supone y de la menor cantidad de fangos que genera el sistema.
2. Oxidación con **peróxido de hidrógeno**, que lo convierte en cianato, además, sin la formación de ningún compuesto intermedio. Aparte, tal como se ha comentado y como hemos visto anteriormente, este compuesto facilita la ruptura de complejos metálicos, posibilitando su posterior precipitación.
3. Destrucción de cianuros utilizando un **ácido mono-peróxido sulfúrico**, el cual actúa no como ácido, sino como sal triple acídica. El proceso que tiene lugar es complejo; sólo añadir el hecho de que con este método se incrementa notablemente la velocidad de reacción con el cianuro, alcanzando unos niveles óptimos de depuración del compuesto.
4. Oxidación de cianuros mediante **oxígeno o aire, con presencia de carbón activo**. Al igual que en el segundo caso, el cianuro se oxida gracias a la presencia de oxígeno. Para facilitar el contacto entre el líquido y el oxígeno –o aire– se hace pasar a contracorriente a través de una columna llena de carbón activo. En este caso, la oxidación catalítica del cianuro tiene lugar en la superficie del carbón. También existe la posibilidad de airear el agua que contiene cianuros dentro de un tanque donde hay partículas de carbón activo en suspensión. El resultado final en ambos casos es la formación de un cianato, con la ventaja de una menor generación de fangos residuales al final del tratamiento en comparación con el caso convencional con hipoclorito sódico.
5. Destrucción de cianuros mediante un **proceso de oxidación anódica**. El mecanismo de reacción que tiene lugar es bastante complejo, ya que se produce un gran número de reacciones. El sistema consiste en oxidar en una celda electrolítica, bajo diversas condiciones de trabajo, el cianuro que pasa a la forma oxidato en el ánodo. Se trata de un método lento y que sólo es útil para soluciones de poco volumen y concentradas (por ejemplo, depuración de baños con metales preciosos). Como aspectos interesantes del método, cabe citar que la reacción es totalmente irreversible, no siendo posible la

formación de cianuros por reducción del cianato en el cátodo. Un caso ideal es aquel en el que, además de la oxidación del cianuro en el ánodo de la celda electrolítica, tiene lugar la reducción del metal disuelto en la solución.

6. Destrucción de cianuros por **precipitación con sales de Fe (II)**. Los iones ferrosos forman, con los cianuros, un complejo extraordinariamente estable, que se puede precipitar (son los denominados hexacianoferratos o ferrocianuros). Se trata de un buen sistema para eliminar cianuros en soluciones concentradas, obteniéndose un precipitado fácilmente filtrable. Como inconveniente grave, tenemos que en el fango formado, el cianuro no se encuentra oxidado, convirtiendo el residuo en tóxico.
7. Existe otra alternativa, aunque sólo la mencionaremos de pasada, ya que se trata de un proceso caro y que requiere mucho control. Es la **destrucción térmica de cianuros** mediante el uso de fuentes de combustión. A altas temperaturas (entre 140 y 220 °C) se consigue la hidrólisis del cianuro y su posterior combustión.

4.3 Reducción de cromo hexavalente

En cuanto a las alternativas al tratamiento convencional, son las siguientes:

1. Reducción con **dióxido de sulfuro** gaseoso. El sistema consiste en mezclar en un tanque de reacción el líquido residual con el gas; la reacción es muy rápida, alcanzándose buenos niveles de reducción. Como principal ventaja, podemos decir que, tratándose de un gas, no genera tanta cantidad de fangos como en el caso del uso del bisulfito sódico. Además, puesto que el gas es ácido, no tiene lugar prácticamente consumo de ácido extra para reducir el pH en el proceso.
2. Reducción de cromo con la utilización de **compuestos de Fe (II)**. La principal ventaja del método es que el proceso es, prácticamente, independiente del pH –dentro de ciertos márgenes; es decir, no es preciso, como en el caso del bisulfito, tener que bajar el pH hasta valores de 2-2,5 u.pH. Esto es especialmente interesante de cara a reducir el consumo de ácido y de álcali para volverlo a subir, hasta valores de precipitación de metales; además, la presencia de iones férricos en el sistema actúa como agente floculante, favoreciendo la decantación de los hidróxidos metálicos formados posteriormente.
3. Reducción de cromo hexavalente por vía **catódica**. Al igual que sucede en el caso del cianuro, los cromados pueden reducirse en el cátodo de una celda electrolítica. El proceso, no obstante, sólo es efectivo a bajas concentraciones de cromados (<0,5 mg/l). De todas formas, es un método no adoptado en la práctica, a causa de las diversas dificultades técnicas que comporta (proceso complejo electroquímicamente, consumo eléctrico importante, reacciones inversas con nueva formación del compuesto, etc.).

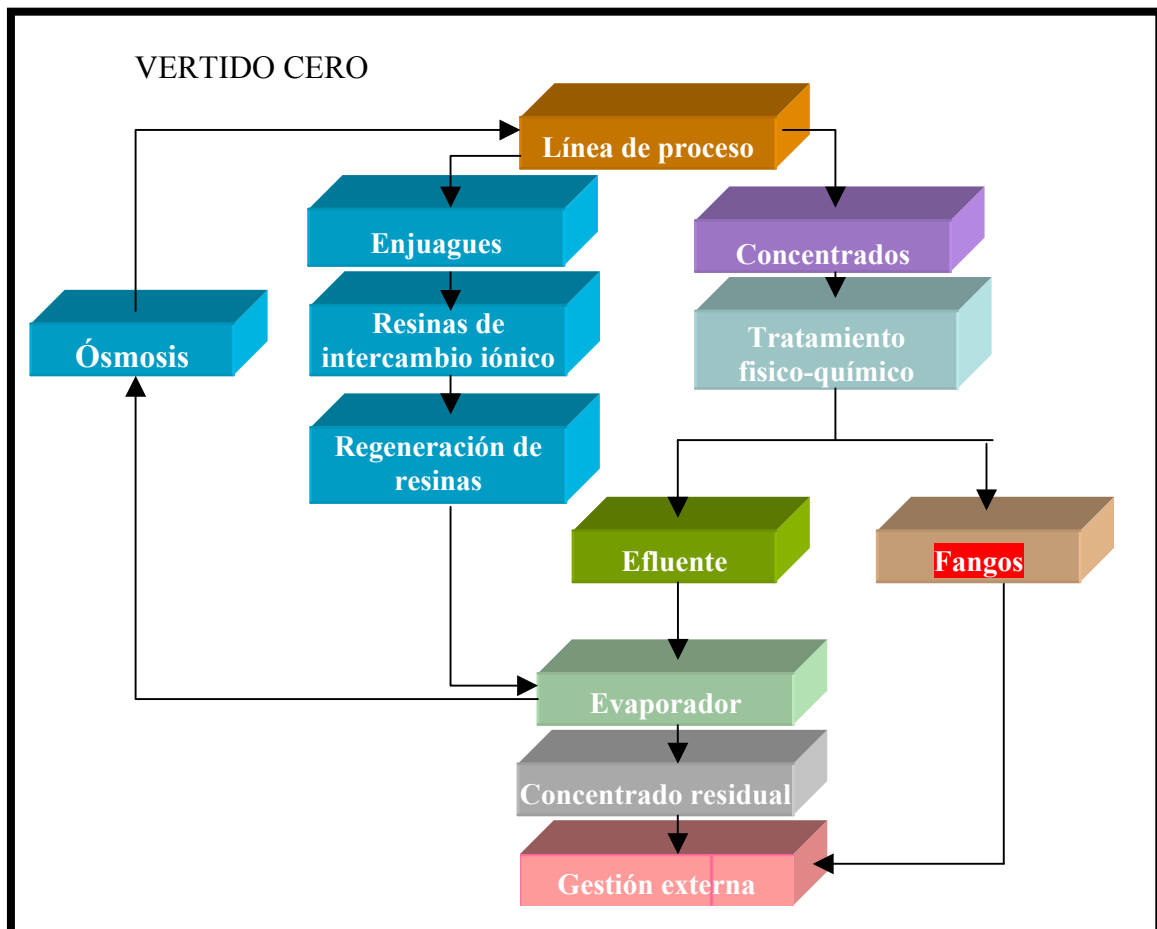
4.4 Coagulación

En lo que respecta al proceso de coagulación habitual, con cloruro férrico, comentaremos brevemente aquí una tecnología utilizada entre las empresas del sector y que es la implantación de plantas de **electrocoagulación**. El sistema consiste, en esencia, en la fabricación *in situ* de los iones ferrosos o férricos indispensables para obtener una buena formación de coágulos, previos a la etapa de neutralización y precipitación de los metales.

En sí, el método utiliza una celda electrolítica donde, mediante el paso de una corriente eléctrica, se obtiene la formación de iones de hierro procedentes de un ánodo fabricado con plancha de hierro. De hecho, el propio industrial se fabrica su propio coagulante.

Como ventaja principal, podemos citar la reducción de la conductividad del agua; recordemos que, en el caso tradicional, los iones férricos son aportados por una solución de cloruro férrico, cuyos cloruros después quedan solubilizados en el agua depurada. También hay una menor demanda de solución alcalina para elevar el pH de la solución y, en consecuencia, una disminución sensible en el volumen de fangos residuales generados. El principal inconveniente es el elevado coste de la unidad de electrocoagulación. Esta técnica es aplicable en casos en los que las características de las aguas presentan poca variabilidad y, aún así, es aconsejable disponer de tanques de homogeneización para conseguir esta regularidad. En función del tipo de agua a homogeneizar, es necesario instalar un sistema de agitación para evitar los precipitados.

Finalmente, para acabar este apartado, volver a mencionar las diversas utilidades de los equipos destinados a la recuperación y reciclaje del agua que, en los últimos años, se están imponiendo dentro del sector para llegar a alcanzar un “*vertido cero*”; todos ellos ya han sido lo suficientemente tratados en apartados anteriores, así que aquí sólo haremos alusión a un tipo de instalación que está ganando terreno en este campo y que es la combinación de sistemas de reciclaje de aguas de lavado mediante el uso de resinas de intercambio iónico, a veces combinados con equipos de ósmosis inversa, combinados con evaporadores al vacío para la concentración de los eluatos procedentes de la regeneración de resinas y de los baños de pretratamiento agotados. El resultado final es un concentrado residual que se debe gestionar como residuo especial.



5. OTROS ASPECTOS A CONSIDERAR

En este apartado se tiene en cuenta todo un conjunto de recomendaciones varias encaminadas a reducir el riesgo de contaminación, ya sea del lugar de trabajo o del medio ambiente. Como se verá, muchas de estas propuestas ya han sido recomendadas en apartados anteriores, especialmente en lo que hace referencia a las buenas prácticas medioambientales.

5.1. Localización de almacenes de productos

Como norma general, los almacenes se deberán situar tan cerca como sea posible del lugar donde se produce el consumo de los productos. Aunque es más recomendable siempre un único lugar de almacenamiento.

Evidentemente, habrá que situarlo también en un emplazamiento fácilmente accesible para los camiones de transporte.

5.2. Gestión del almacén

Sólo debería tener acceso al almacén un determinado número de personas, las cuales, entre otros aspectos, deberían disponer de suficiente información y formación básica relativas a las características y peligros que comportan los productos almacenados.

Como se ha visto anteriormente en otros apartados, hay que distribuir los productos evitando las mezclas, mediante su etiquetado visible, la confección de cubetas de retención separadoras (ácidos de bases y, especialmente, de cianuros), etc.

También es recomendable la preparación de fichas de estado de las existencias que permitan controlar las entradas y salidas de productos del almacén y reducir el riesgo de quedarse sin un aprovisionamiento adecuado de productos.

5.3. Cubetas de retención

Han de permitir recoger con suficiencia posibles derramamientos y garantizar un grado de estanqueidad alto.

Es conveniente que la cubeta permita recoger tanto los derramamientos verticales como los horizontales, procedentes de fugas en tanques altos.

Como se ha dicho en repetidas ocasiones, las cubetas han de ser de tipo separativo, evitando mezclas entre ácidos y cianuros, y aquellas otras mezclas que, por su naturaleza, dificulten o impidan la reutilización de los productos derramados.

5.4. Alimentación de agua

Lo más recomendable sería que la alimentación de agua al taller galvánico fuera única y dispusiera de un contador y de una electroválvula conectada a un sistema de medida del caudal: si el consumo se dispara de forma sostenida, se actúa sobre la electroválvula cerrando el sistema de alimentación.

Un sistema recomendable es la instalación de una cuba de almacenamiento de agua, dimensionada para varias horas de funcionamiento, de forma que permita almacenar el agua depurada en malas condiciones. De este modo, se evitaría su vertido directo al exterior, en caso de depuración defectuosa o de accidente.

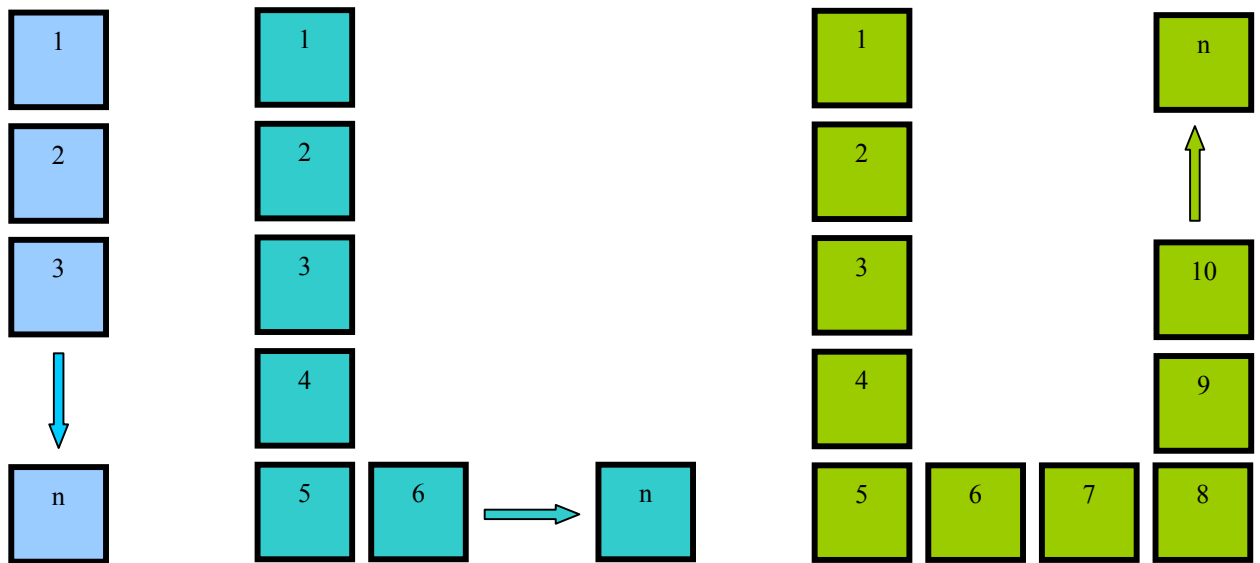
5.5. Protección de conducciones

Las conducciones de reactivos o de efluentes que han sido mal fijadas o poco protegidas pueden convertirse en fuentes de generación de corrientes residuales, a causa de roturas o fisuras.

Se precisará, por lo tanto, soportarlas adecuadamente y protegerlas con elementos resistentes para evitar estas posibilidades.

5.6. Diseño de las líneas de proceso

Teniendo en cuenta que los principales problemas medioambientales del sector vienen derivados del arrastre, habrá que prever, en el diseño de la planta galvánica, el mínimo número de cruzamientos de corredores, justamente para evitar que parte del arrastre producido con el movimiento entre cubas, acabe cayendo al suelo de la nave.



Puesto que esto no siempre es factible – sobre todo en plantas manuales con diferentes acabados finales – hay que prever la colocación de bandejas bajo los corredores que recojan este goteo para evitar que llegue al suelo. Estas bandejas tienen que estar conectadas con el depósito correspondiente –preferentemente, en concentrados– para una posterior depuración del efluente.

5.7. Traspase de efluentes

Los equipos de bombeo de efluentes y de otros líquidos han de cumplir asimismo una serie de aspectos:

- las bombas han de ser de la calidad adecuada al tipo de líquido de traspase; por ejemplo, se ha de tener cuidado con el interior de las bombas destinadas a bombear efluentes o líquidos crómicos debido al fuerte ataque sobre el hierro e, incluso, sobre el propio acero inoxidable;
- tener la precaución de doblar las bombas destinadas a bombear los efluentes diluidos hacia la planta de tratamiento de aguas, ya que son los que más caudal aportan a la planta;
- en determinados casos, puede ser interesante la colocación de contadores horarios de funcionamiento de las bombas.

5.8. Recogida de efluentes

La recogida de los efluentes se ha de llevar a cabo en canalizaciones cerradas, por separado para cada tipo de efluente y de material resistente. Como precaución, hay que tener en cuenta el vaciado periódico y habitual de los baños de desengrase que pueden hallarse a unos 65-70°C de temperatura: una conducción de PVC, por ejemplo, no resistirá el calentamiento producido y se deformará. Si esta misma conducción la realizamos en hierro, que resistirá bien la temperatura, no aguantará demasiado el ataque de la sosa, por ejemplo, y se irá perforando con el tiempo. Un buen material para este efluente es el acero inoxidable.

En cuanto a la segregación de efluentes, se precisan, como mínimo, las siguientes conducciones:

1. Concentrados ácidos y crómicos
2. Concentrados alcalinos
3. Concentrados cianurados (no mezclarlos con los anteriores por el riesgo de formación de complejos entre los metales de los baños cianurados y los complejantes presentes en los desengrasantes).
4. Diluidos ácidos y alcalinos no cianurados
5. Diluidos crómicos
6. Diluidos cianurados

Además, es interesante indicar que la recogida de efluentes ha de prever las futuras modificaciones en la planta de proceso. El sistema ideal consiste en una galería accesible en la que se fijan las conducciones.

5.9. Ambiente de trabajo

Un taller mojado de agua, con el suelo resbaladizo, con una atmósfera húmeda y corrosiva, favorece los accidentes de trabajo y las enfermedades. Es preciso trabajar en unas condiciones adecuadas de limpieza, de orden, disponiendo de los elementos, equipos, etc. idóneos para cada una de las tareas desarrolladas.

De otro modo, se está favoreciendo una dejadez generalizada que acabará repercutiendo en una mala calidad de la producción, un enrarecimiento del ambiente de trabajo y, probablemente, un aumento en la generación de corrientes residuales.

La experiencia demuestra que un taller sucio y contaminante es, generalmente, menos competitivo en el plano de la productividad.

5.10 Automatización y programación de los procesos

Determinar cuáles son los parámetros de control de los procesos y automatizarlos es una de las vías a nuestro alcance para optimizar la actividad productiva, a la vez que se consigue la minimización de las corrientes residuales generadas. Además, permitirá que todas las piezas sean tratadas de igual forma de acuerdo con el estándar de calidad que tenga la empresa.

La viabilidad de la aplicación de esta alternativa dependerá enormemente de las características concretas de la empresa (tamaño, espacio, etc.).

6. ANÁLISIS DE LA VIABILIDAD TÉCNICA Y ECONÓMICA DE ALGUNAS DE LAS ALTERNATIVAS

Para desarrollar este capítulo, se han cogido dos modelos reales de empresas de tratamientos de superficie (empresas A y B) y se han valorado los diversos costes y ahorros que intervienen en el momento de llevar a cabo la implantación de algunas alternativas. El objetivo de este capítulo consiste en establecer, con cierta fiabilidad, el período de retorno de la inversión (PRI) propuesta para algunas de las alternativas de minimización identificadas.

Empresa A:

Pequeña empresa de tipo familiar con cinco trabajadores, que dispone de líneas manuales de acabados en níquel y cromo en bastidor.

Empresa B:

Empresa mediana, con cuarenta trabajadores, dedicada al anodizado duro de aluminio mediante líneas automáticas en bombo.

A continuación, damos paso al estudio de viabilidad técnica y económica de buena parte de las alternativas de minimización vistas hasta ahora.

EMPRESA A:

Tipología: empresa de ámbito familiar, muy pequeña, dedicada a niquelados y cromados con líneas manuales en bastidor.

Descripción general:

Número trabajadores: 5 *Horas trabajo/día:* 8 *Turnos de trabajo:* 1

Actividad: recubrimientos electrolíticos, níquel y cromo decorativo sobre piezas de hierro y latón.

Tipo de instalación: pequeña instalación manual, con corredores y espacios entre cubas.

Producción: unos 2,3 millones de dm²/año para iluminación.

Facturación: 19.833,99 €/año.

Principales contaminantes producidos:

Aguas residuales:

- Caracterización: efluentes diluidos en continuo y concentrados por cargas con:
 - pH altamente alcalino o ácido, según el concentrado;
 - presencia de metales pesados, como el hierro, níquel, cobre y zinc;
 - presencia de cromo hexavalente;
 - otros compuestos presentes como sales solubles son cloruros, sulfatos y boro.
- Régimen de vertido: la empresa vierte aproximadamente 1,4 m³/h, de forma continuada, a lo largo de las 8 horas de trabajo al día.

Residuos industriales:

- Caracterización:
 - Peligrosos:
 - ⇒ aguas residuales y soluciones concentradas de baños agotados;
 - ⇒ fangos de depuración de efluentes;
 - ⇒ envases de materias primas, vacíos, sucios.
 - No peligrosos:
 - ⇒ residuos generales no recogidos selectivamente.

Gestión actual de los contaminantes producidos:

Aguas residuales: tratamiento físico-químico consistente en reducción de cromo hexavalente a trivalente, mediante bisulfito sódico, coagulación con cloruro férrico, neutralización con hidróxido sódico, floculación con un polielectrolito aniónico, sedimentación y concentración de fangos y su secado con filtro prensa.

Residuos industriales: excepto las aguas residuales y soluciones concentradas de baños agotados que son tratadas en la propia empresa, el resto de residuos generados por la empresa son gestionados externamente a través de empresas autorizadas.

Costes de la gestión actual de contaminantes:

Por pérdidas de materias primas y agua: 9.616,19 €/año.

Aguas residuales: 23.439,47 €/año.

Residuos industriales: 2.704,55 €/año.

DESCRIPCIÓN DE ALTERNATIVAS DE MINIMIZACIÓN

Corriente residual analizada: contaminación de aguas de lavado.

Alternativa de minimización: reducción del arrastre.

Opciones de minimización: incorporación de tapajuntas entre cubas del baño y del lavado posterior.

Otras corrientes afectadas: ninguna.

Materias primas afectadas: todas las que componen los distintos baños de proceso.

Procesos o productos afectados: toda la planta galvánica.

Posible ahorro en los consumos de materias primas y auxiliares: 30% del arrastre.

Baño de proceso o componente	Pérdida por arrastre	Ahorro por reducción de pérdida (30%)	Total ahorro (€/año)
Desengrase ultrasonidos	88,70 kg	26,61 kg	14,38
Desengrase electrolítico	68,90 kg	20,67 kg	31,31
Decapante	24,64 kg	7,39 kg	14,44
Cloruro de níquel	78,85 kg	23,65 kg	50,47
Sulfato de níquel	266,10 kg	79,83 kg	199,11
Ácido bórico	49,28 kg	14,78 kg	11,11
Abrillantadores	24,64 kg	7,39 kg	49,54
Aditivos	3,94 kg	1,18 kg	3,43
Óxido de cromo	147,84 kg	44,35 kg	217,25
Trióxido de cromo	177,40 kg	53,22 kg	391,19
TOTALES	930,29 kg	279,07 kg	1.009,41

Tabla 8

Por lo que respecta al agua de red, consideramos que si reducimos la aportación de contaminantes al agua de lavado un 30%, el caudal de renovación también se podrá reducir en la misma proporción; así tenemos que los 2.443,7 m³/año se podrían reducir en 733,1 m³. Ello supone un ahorro de unos 1.005,02 €/año.

En cuanto al agua destilada, también se puede aplicar el mismo razonamiento, y de los 9,9 m³/año, la empresa se podría ahorrar unos 2,97. Ello supone un ahorro económico de unos 62,48 €/año.

Posible reducción de contaminantes: aquí también hay que aplicar la misma reducción del 30%, dado que todas las materias primas que se pierden por arrastre se convierten en residuo, vía aguas residuales.

Justificación técnica de cada opción:

Contraste de la tecnología: la colocación de tapajuntas no supone ningún cambio sustancial en el proceso productivo aplicado por la empresa; sólo regresa al baño parte del goteo que se pierde en el arrastre.

Efecto sobre la calidad del proceso o producto: ninguno.

Requisito de espacio: prácticamente nulo; justamente lo que se pretende es ocupar un espacio vacío para evitar la caída al suelo de gotas con sales de productos del baño de proceso.

Tiempo de implantación: muy reducido; la colocación de tapajuntas se hace directamente encima de las cubas implicadas.

Requisitos para su utilización: es importante dar la pendiente adecuada al tapajuntas, de forma que se permita la reincorporación del líquido hacia el baño de proceso.

Justificación económica de cada opción (en €):

Gastos:

- *Equipos:* unos 3.01 € c.u. x 6 cubas de proceso = 18,03 €.
- *Instalación:* 2 h x 15,03 €/h = 30,05 €.
- *Ingeniería*
- *Servicios*
- *Puesta en funcionamiento*
- *Valor equipo al final vida útil*
- *Formación*
- *Materias primas*
- *Gestión de contaminantes*
- *Operación*
- *Mantenimiento*
- *Otros*
- **TOTAL: 48,08 €.**

Ingresos:

- *Venta equipos existentes*
- *Incremento precio de venta del producto*
- *Incremento en la producción*
- *Venta y/o valorización de subproductos*
- *Ahorro en materias primas y auxiliares:* 2.076,91 €/año (cálculos en tabla).
- *Ahorro en la gestión de contaminantes:* (733,1 m³ de agua de red + 2,97 m³ de agua destilada que se dejarían de depurar) x 0,9 €/m³ de depuración de aguas y de transporte y gestión de fangos de depuración = 663,58 €/año.
- **TOTAL: 2.740,48 €/año.**

Período de retorno de la inversión: unos 6,4 días.

DESCRIPCIÓN DE ALTERNATIVAS DE MINIMIZACIÓN

Corriente residual analizada: contaminación de aguas de lavado.

Alternativa de minimización: reducción del arrastre.

Opciones de minimización: introducción de lavados estancos de recuperación después de determinados baños de proceso.

Otras corrientes afectadas: generación de fangos de depuración.

Materias primas afectadas: todas las que componen los distintos baños de proceso implicados.

Procesos o productos afectados: toda la planta galvánica.

Posible ahorro en los consumos de materias primas y auxiliares

Baño de proceso o componente	Número de lavados estancos de recuperación	Ahorro por reducción de pérdida	Total ahorro (€/año)
Desengrase ultrasonidos	1	62,09 kg (70%)	97,02
Desengrase electrolítico	1	48,23 kg (70%)	73,05
Niquelado	2	380,51 kg (90%)	940,95
Cloruro de níquel		70,96 kg (90%)	151,40
Sulfato de níquel		239,49 kg (90%)	597,33
Ácido bórico		44,35 kg (90%)	33,32
Abrillantadores		22,17 kg (90%)	148,62
Aditivos		3,54 kg (90%)	10,28
Cromado		3	318,73 kg (98%)
Óxido de cromo	144,88 kg (98%)		709,66
Trióxido de cromo	173,85 kg (98%)		1.277,66
TOTALES	7	809,56 kg	3.098,54

Tabla 9

Por lo que respecta al agua de lavado, consideramos que, por cada cuba estanca de recuperación, el caudal de agua del lavado posterior puede reducirse en 1/5. Por lo tanto, tendríamos:

Baño de proceso precedente	Caudal de agua de renovación (l/h)		Reducción de caudal de lavado (l/h)	Ahorro económico (€/año)
	Actual	con recuperaciones		
Desengrase ultrasonidos	560	112	448	1.080,93
Desengrase electrolítico	280	56	224	540,47
Niquelado	2.800	112	2.688	6.485,47
Cromado	4.480	36	4.444	10.722,48
TOTALES	8.120	316	7.804	18.829,48

Tabla 10

Posible reducción de contaminantes: aquí también hay que aplicar la misma reducción de 1/5 del caudal necesario por cada lavado estanco de recuperación que se convierte en un agua residual a tratar; por lo tanto, tendremos una reducción de unos 13.735 m³/ anuales de aguas residuales.

Justificación técnica de cada opción:

Contraste de la tecnología: como se ha visto a lo largo del presente documento, los lavados estancos de recuperación están especialmente indicados en aquellos baños de proceso que operan a temperatura superior a los 40 °C, ya que permiten ir devolviendo al baño agua y sales, gracias a las pérdidas por evaporación que éste experimenta.

Efecto sobre la calidad del proceso o producto: la introducción de estos lavados estancos de recuperación, como ya se ha visto en el documento, puede suponer la reintroducción en el baño de ciertos contaminantes generados por impurezas presentes en los ánodos, por el ataque de la superficie del metal, etc. Por lo tanto, deberán aplicarse sistemáticamente unos criterios de control analítico para evitar la contaminación del baño.

Requisito de espacio: cada lavado estanco de recuperación supone una cuba a introducir en la actual línea de proceso. Así, deberá contar con el espacio necesario para prolongar las líneas.

Tiempo de implantación: relativamente breve; con unos 3-4 días se pueden realizar las modificaciones pertinentes en las líneas de proceso.

Requisitos para su utilización: al tratarse de un lavado más, durante el proceso no requiere ninguna medida especial; es importante, no obstante, recordar que la empresa tendrá que devolver diariamente al baño las pérdidas por evaporación a partir de las recuperaciones instaladas: de la última recuperación hacia la anterior, y así sucesivamente, hasta llegar a la primera recuperación que sirve como aportación al baño.

Justificación económica de cada opción (en €):

Gastos:

- *Equipos:* unos 721,21 € c.u. x 7 cubas de lavado = 5048,5 €.
- *Instalación:* 2 x(32 h x 15,03 €/h) = 961,62 €.
- *Ingeniería*
- *Servicios:* modificación de conducciones de agua de lavado: 1.502,53 €.
- *Puesta en funcionamiento*
- *Valor equipo al final vida útil*
- *Formación*
- *Materias primas*
- *Gestión de contaminantes*
- *Operación:* ½ h diaria para reincorporar pérdidas por evaporación x 220 días/año x 15.03 €/h = 1.652,78 €/año.

- *Mantenimiento*
- *Otros*
- **TOTAL INVERSIÓN: 7.512,65 €.**
- **TOTAL COSTES OPERATIVOS: 1.652,78 €/año.**

Ingresos:

- *Venta equipos existentes*
- *Incremento precio de venta del producto*
- *Incremento en la producción*
- *Venta y/o valorización de subproductos*
- *Ahorro en materias primas y auxiliares: 21.928,02 €/año (según cálculos en tablas adjuntas).*
- *Ahorro en la gestión de contaminantes: 13.735 m³/año de agua de red que se dejarían de depurar) x 0,9 €/m³ de depuración de aguas y de transporte y gestión de fangos de depuración = 12.382,35 €/año.*
- **TOTAL: 34.310,37 €/año.**

Período de retorno de la inversión: unos 2,8 meses.

DESCRIPCIÓN DE ALTERNATIVAS DE MINIMIZACIÓN

Corriente residual analizada: contaminación de aguas de lavado.

Alternativa de minimización: reducción del consumo de agua de lavado.

Opciones de minimización: incorporación de lavados dobles en cascada a contracorriente.

Otras corrientes afectadas: generación de fangos de depuración.

Materias primas afectadas: ninguna.

Procesos o productos afectados: estructura de lavados de la planta galvánica.

Posible ahorro en los consumos de materias primas y auxiliares: ahorro en el consumo de agua de lavado:

Baño de proceso o componente	Lavado sencillo actual con caudal (l/h)	Lavado doble en cascada (l/h)	Reducción en el consumo de agua (l/h)	Total ahorro (€/año)
Desengrase ultrasonidos	560	18,0	542,0	1.307,74
Desengrase electrolítico	280	12,5	267,5	645,42
Decapado	400	15,0	385,0	928,92
Niquelado	2.800	39,6	2.760,4	6.660,28
Cromado	4.480	50,0	4.430,0	10.688,70
TOTALES	8.520	135,1	8.384,9	20.231,07

Tabla 11

Posible reducción de contaminantes: aquí también hay que aplicar la misma reducción para cada posición de lavado, dado que todas las aguas de lavado se convierten en residuales.

Justificación técnica de cada opción:

Contraste de la tecnología: la introducción de sistemas de lavado múltiples en cascada a contracorriente se utiliza ampliamente por parte de muchas empresas del sector, y ofrece todas las ventajas mencionadas en cuanto a reducción importante del caudal de lavado para una misma calidad de lavado.

Efecto sobre la calidad del proceso o producto: ninguno negativo, en cualquier caso, mejora del lavado actual.

Requisito de espacio: la introducción de estos lavados dobles supone la prolongación de la línea de proceso y la intercalación de cubas entre las ya existentes.

Tiempo de implantación: reducido; básicamente el tiempo necesario para mover las cubas para hacer sitio a los lavados dobles y realizar las nuevas conducciones de agua.

*Requisitos para su utilización :*ninguno en especial; sólo se requiere respetar el sentido de las piezas por las dos cubas conectadas, entrando por el agua más sucia y saliendo por la más limpia.

Justificación económica de cada opción (en €):

Gastos:

- *Equipos:* unos 1.502,3 € c.u. x 5 cubas de proceso = 7.512,65 €.
- *Instalación:* 20 h x 15,03 €/h = 30,05 €.
- *Ingeniería*
- *Servicios*
- *Puesta en funcionamiento*
- *Valor equipo al final vida útil*
- *Formación*
- *Materias primas*
- *Gestión de contaminantes*
- *Operación*
- *Mantenimiento*
- *Otros*
- ***TOTAL: 7.813,16 €.***

Ingresos:

- *Venta equipos existentes*
- *Incremento precio de venta del producto*
- *Incremento en la producción*

- *Venta y/o valorización de subproductos*
- *Ahorro en materias primas y auxiliares: 20.231,07 €/año (según cálculos en tabla adjunta).*
- *Ahorro en la gestión de contaminantes: 14.757 m³ x 0,9 €/m³ de depuración de aguas y de transporte y gestión de fangos de depuración = 13.303,70 €/año.*
- **TOTAL: 33.534,77 €/año.**

Período de retorno de la inversión: unos 2,8 meses.

DESCRIPCIÓN DE ALTERNATIVAS DE MINIMIZACIÓN

Corriente residual analizada: contaminación de aguas de lavado.

Alternativa de minimización: reducción del consumo de agua de lavado.

Opciones de minimización: incorporación de caudalímetros en cada posición de lavado.

Otras corrientes afectadas: generación de fangos de depuración.

Materias primas afectadas: ninguna.

Procesos o productos afectados: ninguno.

Posible ahorro en los consumos de materias primas y auxiliares: ahorro en el consumo de agua de lavado:

Baño de proceso o componente	Lavado sencillo caudal (l/h) habitual	Lavado sencillo caudal (l/h) con caudalímetros	Reducción en el consumo de agua (l/h)	Total ahorro (€/año)
Desengrase ultrasonidos	1.000	560	440	1.061,63
Desengrase electrolítico	500	280	220	530,81
Decapado	700	400	300	723,83
Niquelado	5.000	2.800	2.200	5.308,16
Cromado	8.000	4.480	3.520	8.493,05
TOTALES	15.200	8.520	6.680	16.117,49

Tabla 12

Posible reducción de contaminantes: aquí también hay que aplicar la misma reducción para cada posición de lavado, dado que todas las aguas de lavado se convierten en residuales.

Justificación técnica de cada opción:

Contraste de la tecnología: la introducción de caudalímetros permite conocer y regular las necesidades reales, los caudales de lavado, y no presenta ninguna dificultad técnica en el proceso; en cambio, ofrece el máximo de ventajas con respecto al control y la regulación del caudal de lavado.

Efecto sobre la calidad del proceso o producto: ninguno negativo, siempre y cuando se respete la razón de dilución por cada posición de lavado.

Requisito de espacio: la introducción de caudalímetros no supone ningún requisito de espacio con respecto a la línea galvánica.

Tiempo de implantación: reducido, alrededor de unas cinco horas para el conjunto de cubas.

Requisitos para su utilización: ninguno en especial; sólo hay que regular el caudal de lavado con la válvula que incorpora el propio elemento.

Justificación económica de cada opción (en €):

Gastos:

- *Equipos:* unos 270,46 € c.u. x 5 cubas de lavado = 1.352,28 €.
- *Instalación:* 5 h x 15,03 €/h = 75,13 €.
- *Ingeniería*
- *Servicios*
- *Puesta en funcionamiento*
- *Valor equipo al final vida útil*
- *Formación*
- *Materias primas*
- *Gestión de contaminantes*
- *Operación*
- *Mantenimiento*
- *Otros*
- ***TOTAL: 1.427,40 €.***

Ingresos:

- *Venta equipos existentes*
- *Incremento precio de venta del producto*
- *Incremento en la producción*
- *Venta y/o valorización de subproductos*
- *Ahorro en materias primas y auxiliares:* 16.117,49 €/año (según tabla).
- *Ahorro en la gestión de contaminantes:* 11.757 m³ x 0,9 €/m³ de depuración de aguas y de transporte y gestión de fangos de depuración = 10.599,15 €/año.
- ***TOTAL: 2.676,15 €/año.***

Período de retorno de la inversión: unos 19,5 días.

DESCRIPCIÓN DE ALTERNATIVAS DE MINIMIZACIÓN

Corriente residual analizada: soluciones alcalinas con aceites residuales.

Alternativa de minimización: reutilización de la solución para la introducción de un predesengrase.

Opciones de minimización: implantación de dos cubas de predesengrase, una para cada baño.

Otras corrientes afectadas: aguas residuales a tratar.

Materias primas afectadas: desengrase por ultrasonidos y desengrase electrolítico.

Procesos o productos afectados: preparación de la superficie metálica a recubrir electrolíticamente.

Posible ahorro en los consumos de materias primas y auxiliares: reducción en un 25% del consumo de sales y agua para la preparación de los desengrases.

Posible reducción de contaminantes: reducción en un 25% del volumen de solución acuosa alcalina con aceites.

Justificación técnica de cada opción:

Contraste de la tecnología: la aplicación de este método se utiliza de forma moderada dentro del sector. En realidad, se trata de desengrasar en dos cubas –la primera más diluida– lo que actualmente se efectúa con una.

Efecto sobre la calidad del proceso o producto: la introducción de un primer baño de desengrase permite realizar mejor esta operación, y con ello se consigue un nivel mejor de eliminación de aceites y grasas. Por lo tanto, se puede afirmar que mejora la calidad del proceso.

Requisito de espacio: evidentemente, cada cuba de predesengrase supone prolongar la línea galvánica en la medida en que se colocan nuevas cubas de proceso.

Tiempo de implantación: alrededor de un día de montaje.

Requisitos para su utilización: no se requiere ningún condicionante en su utilización; simplemente, se tienen que realizar las mismas operaciones habituales que en el caso del desengrase utilizado.

Justificación económica de cada opción (en €):

Gastos:

- *Equipos:* 2 cubas x 901,52 € c.u. = 1.803,04 €.
- *Instalación:* 1 operario x 1 día x 8 h x 15,03 €/h = 120,20 €.
- *Ingeniería*
- *Servicios*
- *Puesta en funcionamiento*
- *Valor equipo al final vida útil*
- *Formación*
- *Materias primas*
- *Gestión de contaminantes*

- Operación
- Mantenimiento
- Otros
- **TOTAL INVERSIÓN: 1.923,24 €.**

Ingresos:

- Venta equipos existentes
- Incremento precio de venta del producto; incremento en la producción
- Venta y/o valorización de subproductos
- Ahorro en materias primas y auxiliares: 25% de 450,76 €/año en **ultrasonidos** + 25% de 681,55 €/año en electrolítico = 1112,69 €/año + 170,39 €/año = 283,08 €/año; 25% de 2.100 l de agua para el ultrasonidos a 1,37 €/m³ + 25% de 8.400 l de electrolítico a 1,37 €/m³ = 0,72 €/año + 2,88 €/año = 3,60 €/año 283,08 €/año + 3,60 €/año = 286,68 €/año.
- Ahorro en la gestión de contaminantes: 10.500 l de solución alcalina residual/año x 25% = 2.625 l; 2.625 l x 0,27 €/l = 709,95 €/año.
- **TOTAL: 996,62 €/año.**

Período de retorno de la inversión: aproximadamente 1,9 años.

DESCRIPCIÓN DE ALTERNATIVAS DE MINIMIZACIÓN

Corriente residual analizada: solución ácida con metales disueltos.

Alternativa de minimización: reutilización de la solución mediante la introducción de un predecapado.

Opciones de minimización: implantación de una cuba de predecapado.

Otras corrientes afectadas: aguas residuales a tratar.

Materias primas afectadas: decapado ácido.

Procesos o productos afectados: preparación de la superficie metálica a recubrir electrolíticamente.

Posible ahorro en los consumos de materias primas y auxiliares: reducción en un 25% del consumo de sales y agua para la preparación del decapado.

Posible reducción de contaminantes: reducción en un 25% del volumen de solución ácida con metales.

Justificación técnica de cada opción:

Contraste de la tecnología: la aplicación de este método se utiliza de forma moderada dentro del sector. En realidad, se trata de decapar en dos cubas –la primera más diluida– lo que actualmente se efectúa con una.

Efecto sobre la calidad del proceso o producto: la introducción de un primer baño de decapado permite realizar mejor esta operación, y con ello se consigue un nivel mejor de eliminación de óxidos metálicos. Por lo tanto, se puede afirmar que mejora la calidad del proceso.

Requisito de espacio: evidentemente, la cuba de predecapado supone prolongar la línea galvánica en la medida en que se colocan nuevas cubas de proceso.

Tiempo de implantación: sobre ½ día de montaje.

Requisitos para su utilización: no se requiere ningún condicionante en su utilización; simplemente, se tienen que realizar las mismas operaciones habituales que en el caso del decapado utilizado.

Justificación económica de cada opción (en €):

Gastos:

- *Equipos:* 1 cuba x 901,52 € = 901,52 €.
- *Instalación:* 1 operario x ½ día x 8 h x 15,03 €/h = 60,01 €.
- *Ingeniería*
- *Servicios*
- *Puesta en funcionamiento*
- *Valor equipo al final vida útil*
- *Formación*
- *Materias primas*
- *Gestión de contaminantes*
- *Operación*
- *Mantenimiento*
- *Otros*
- **TOTAL INVERSIÓN: 961,62 €.**

Ingresos:

- *Venta equipos existentes*
- *Incremento precio de venta del producto*
- *Incremento en la producción*
- *Venta y/o valorización de subproductos*
- *Ahorro en materias primas y auxiliares:* 25% de 315 l de ácido clorhídrico = 78,75 l; 78,75 l x 0,09 €/l = 7,10 €/año; 25% de 3.150 l de agua a 1,37 €/m³ = 1,08 €/año; 7,10 €/año + 1,08 €/año = 8,18 €/año.
- *Ahorro en la gestión de contaminantes:* 25% de la solución queda como residuo acuoso ácido con metales = 3.150 l/año x 25% = 787,5 l/año de residuo; 787,5 l x 0,15 €/l = 118,32 €/año.

- **TOTAL: 126,50 €/año.**

Período de retorno de la inversión: aproximadamente 7,6 años.

DESCRIPCIÓN DE ALTERNATIVAS DE MINIMIZACIÓN

Corriente residual analizada: solución ácida con metales disueltos.

Alternativa de minimización: sustitución de la solución de decapado con ácido clorhídrico.

Opciones de minimización: utilización de ácido sulfúrico para decapar las piezas de hierro.

Otras corrientes afectadas: aguas residuales a tratar.

Materias primas afectadas: decapado ácido.

Procesos o productos afectados: preparación de la superficie metálica a recubrir electrolíticamente.

Posible ahorro en los consumos de materias primas y auxiliares: reducción en un 15% del consumo de sales y agua para la preparación del decapado.

Posible reducción de contaminantes: reducción en un 15% del volumen de solución ácida con metales.

Justificación técnica de cada opción:

Contraste de la tecnología: tal como hemos visto en el documento, la sustitución del ácido clorhídrico por sulfúrico, aparte de poseer un efecto decapante muy similar, presenta la ventaja de permitir el control del grado de ataque del ácido sobre el hierro, por medio de la temperatura del baño, con lo que consigue la prolongación de la vida útil del baño.

Efecto sobre la calidad del proceso o producto: la sustitución de un ácido por otro permite realizar mejor esta operación, gracias al control del grado de ataque sobre el hierro. Por lo tanto, se puede afirmar que mejora la calidad del proceso.

Requisito de espacio: la misma cuba de decapado sirve para ambos ácidos.

Tiempo de implantación: sobre ½ día de cambio de un baño por otro. Al margen del cambio propiamente dicho, se precisarán unos días para establecer el *modus operandi* con el nuevo baño.

Requisitos para su utilización: para que el sistema sea efectivo, se requiere la instalación de un termómetro que permita el control de la temperatura de trabajo del ácido. Una vez realizadas las pruebas necesarias para determinar el grado de ataque preciso, hay que fijar el intervalo de temperatura de trabajo del baño y, si procede, calentarlo o enfriarlo según corresponda.

Justificación económica de cada opción (en €):

Gastos:

- Equipos
- Instalación: 1 operario x ½ día x 8 h x 15,03 €/h = 60,01 €.

- Ingeniería
- Servicios
- Puesta en funcionamiento: 1 operario x 1 día x 8 h x 15,03 €/h = 120,20 €.
- Valor equipo al final vida útil
- Formación
- Materias primas
- Gestión de contaminantes
- Operación
- Mantenimiento
- Otros
- **TOTAL INVERSIÓN: 180,3 €.**

Ingresos:

- Venta equipos existentes
- Incremento precio de venta del producto
- Incremento en la producción
- Venta y/o valorización de subproductos
- Ahorro en materias primas y auxiliares: 15% de 315 l de ácido clorhídrico = 47,25 l; 47,25 l x 0,09 €/l = 4,26 €/año; 15% de 3.150 l de agua a 1,37 €/m³ = 0,65 €/año; 4,26 €/año + 0,65 €/año = 4,91 €/año.
- Ahorro en la gestión de contaminantes: 15% de la solución queda como residuo acuoso ácido con metales = 3.150 l/año x 15% = 472,5 l/año de residuo; 472,5 l x 0,15 €/l = 70,99 €/año
- **TOTAL: 75,90 €/año.**

Período de retorno de la inversión: aproximadamente 2,4 años.

DESCRIPCIÓN DE ALTERNATIVAS DE MINIMIZACIÓN

Corriente residual analizada: aguas residuales generadas en el proceso de lavado.

Alternativa de minimización: reutilización de parte del agua de lavado.

Opciones de minimización: utilizar el agua de lavado del decapado como lavado del desengrase electrolítico (técnica de skip).

Otras corrientes afectadas: aguas residuales a tratar.

Materias primas afectadas: ninguna.

Procesos o productos afectados: ninguno.

Posible ahorro en los consumos de materias primas y auxiliares: ahorro del consumo de agua en la posición del desengrase electrolítico.

Posible reducción de contaminantes: reducción del tratamiento de agua del decapado.

Justificación técnica de cada opción:

Contraste de la tecnología: la aplicación de este método se utiliza de forma moderada dentro del sector. Tal como ya se ha explicado, no presenta ningún inconveniente dado que las piezas, una vez lavadas con esta agua reutilizada, pasan a la cuba ácida del decapado.

Efecto sobre la calidad del proceso o producto: ninguno significativo.

Requisito de espacio: ninguno.

Tiempo de implantación: sobre ½ día de montaje de conducciones.

Requisitos para su utilización: una vez se haya establecido perfectamente su funcionalidad, no requiere ningún condicionante en su utilización; simplemente, se tienen que realizar las mismas operaciones habituales que en el caso de cualquier lavado.

Justificación económica de cada opción (en €):

Gastos:

- *Equipos*
- *Instalación:* 1 operario x ½ día x 8 h x 15,003 €/h = 60,01 €.
- *Ingeniería*
- *Servicios:* 120,02 € en conducciones de PVC.
- *Puesta en funcionamiento*
- *Valor equipo al final vida útil*
- *Formación*
- *Materias primas*
- *Gestión de contaminantes*
- *Operación*
- *Mantenimiento*
- *Otros*
- ***TOTAL: 180,03 €.***

Ingresos:

- *Venta equipos existentes*
- *Incremento precio de venta del producto*
- *Incremento en la producción*
- *Venta y/o valorización de subproductos*
- *Ahorro en materias primas y auxiliares:* 280 l/h de agua de lavado del desengrase electrolítico x 1.760 h/año = 493 m³/año; 493 m³ a 1,33 €/m³ = 675,86 €/año.
- *Ahorro en la gestión de contaminantes:* 493 m³ x 0,90 €/m³ de depuración de aguas y de transporte y gestión de fangos de depuración = 444,45 €/m³.

- **TOTAL: 1.120,30 €/año.**

Período de retorno de la inversión: unos dos meses.

EMPRESA B:

Tipología: empresa mediana, dedicada al anodizado duro de aluminio mediante líneas automáticas en bombo.

Descripción general:

Número trabajadores: 49 *Horas trabajo/día:* 24 *Turnos de trabajo:* 3

Actividad: rectificación y anodizado duro de aluminio

Tipo de instalación: línea automática en bombo

Producción: 25 millones de piezas de aluminio para el sector de automoción

Principales contaminantes producidos:

Aguas residuales:

- Caracterización: efluentes diluidos en continuo y concentrados por cargas con
 - pH altamente alcalino o ácido según el concentrado
 - presencia de aceites, detergentes, etc.
 - presencia de metales pesados, como es el caso del aluminio
 - presencia de cromo hexavalente
 - otros de los compuestos presentes a modo de sales solubles son: sulfatos, cloruros y nitratos
- Régimen de vertido: alrededor de unos 10,5 m³/día, por cargas

Residuos industriales:

- Caracterización:
 - Peligrosos:
 - ⇒ aguas residuales y soluciones concentradas de baños agotados
 - ⇒ fangos de depuración de efluentes
 - ⇒ soluciones ácidas y alcalinas con aceites
 - No peligrosos:
 - ⇒ residuos generales no recogidos selectivamente

Gestión actual de los contaminantes producidos:

Aguas residuales: tratamiento fisicoquímico consistente en la reducción de cromo hexavalente a trivalente con bisulfito sódico, neutralización con hidróxido cálcico, floculación con polielectrolito aniónico, sedimentación y concentración de fangos y su secado con filtro prensa.

Residuos industriales: excepto las aguas residuales y soluciones concentradas de baños agotados que son tratadas en la propia empresa, el resto de residuos son gestionados externamente, mediante gestores autorizados.

Costes de la gestión actual de contaminantes:

Por pérdidas de materias primas y agua: 1.502,53 €/año

Aguas residuales: 11.118,72€/año

Residuos industriales: 32.454,65 €/año

DESCRIPCIÓN DE ALTERNATIVAS DE MINIMIZACIÓN

Corriente residual analizada: contaminación de aguas de lavado.

Alternativa de minimización: reducción del consumo de agua de lavado.

Opciones de minimización: incorporación de electroválvulas temporizadas en cada posición de lavado.

Otras corrientes afectadas: generación de aguas residuales y de fangos de depuración.

Materias primas afectadas: ninguna.

Procesos o productos afectados: ninguno.

Posible ahorro en los consumos de materias primas y auxiliares: ahorro en el consumo de agua de lavado:

Baño de proceso o componente	Lavado sencillo caudal (l/h) habitual	Lavado sencillo caudal (l/h) con electroválvulas	Reducción en el consumo de agua (l/h) ¹¹	Total ahorro (€/año)
Desengrase	485	291	194	779,05
Decapado	485	291	194	779,05
Anodizado	1.940	1.164	776	3.116,20
Sellado	970	582	388	1.504,01
TOTALES	3.880	2.328	1.552	6.232,40

Tabla 13

Posible reducción de contaminantes: aquí también hay que aplicar la misma reducción para cada posición de lavado, dado que todas las aguas de lavado se convierten en residuales:

$$1.552 \text{ l/h} \times 5.760 \text{ h/año} \times 0,01 \text{ €/l} = 123.573,47 \text{ €/año}$$

Justificación técnica de cada opción:

Contraste de la tecnología: la introducción de electroválvulas conectadas a temporizadores permite ajustar las necesidades reales de los consumos de agua de lavado, no presenta ninguna dificultad técnica en el proceso y, en cambio, ofrece todas las ventajas relativas a una reducción del caudal de lavado.

Efecto sobre la calidad del proceso o producto: ninguno negativo, siempre y cuando se respete la razón de dilución por cada posición de lavado.

Requisito de espacio: la introducción de electroválvulas temporizadas no supone ningún requisito de espacio con respecto a la línea galvánica.

Tiempo de implantación: reducido, alrededor de unas diez horas para el conjunto de cubas.

¹¹ Reducción del caudal de agua de un 40% para cada posición de lavado.

Requisitos para su utilización: ninguno en especial; sólo se requiere regular el caudal de lavado con la válvula que incorpora el propio elemento.

Justificación económica de cada opción (en €):

Gastos:

- *Equipos:* unas 300,51 € c.u. x 4 cubas de lavado = 1.202,02 €.
- *Instalación:* 10 h x 15,03 €/h = 150,25 €.
- *Ingeniería*
- *Servicios*
- *Puesta en funcionamiento*
- *Valor equipo al final vida útil*
- *Formación*
- *Materias primas*
- *Gestión de contaminantes*
- *Operación*
- *Mantenimiento*
- ***TOTAL: 1.352,28 €.***

Ingresos:

- *Venta equipos existentes*
- *Incremento precio de venta del producto*
- *Incremento en la producción*
- *Venta y/o valorización de subproductos*
- *Ahorro en materias primas y auxiliares:* 6.232,40 €/año
- *Ahorro en la gestión de contaminantes:* 123.573,47 €/año
- ***TOTAL: 129.805,87 €/año.***

Período de retorno de la inversión: unos cuatro días.

DESCRIPCIÓN DE ALTERNATIVAS DE MINIMIZACIÓN

Corriente residual analizada: soluciones alcalinas con aceites residuales.

Alternativa de minimización: reutilización de la solución mediante su ultrafiltración.

Opciones de minimización: implantación de dos ultrafiltraciones, una para cada baño de desengrase.

Otras corrientes afectadas: aguas residuales de los lavados de desengrasados a depurar y fangos de depuradora.

Materias primas afectadas: desengrase por ultrasonidos y desengrase químico.

Procesos o productos afectados: preparación de la superficie metálica a ser anodizada electrolíticamente.

Posible ahorro en los consumos de materias primas y auxiliares: reducción en un 95% del consumo de sales y agua para la preparación de los desengrases.

Posible reducción de contaminantes: reducción en un 95% del volumen de solución acuosa alcalina con aceites.

Justificación técnica de cada opción:

Contraste de la tecnología: la tecnología de ultrafiltración con membranas ha sido ensayada e implantada con éxito en empresas del sector. Sin embargo, es preciso realizar ensayos previos con muestras reales del producto contaminado, para establecer la viabilidad técnica del sistema y determinar, en todo caso, el tipo de membrana más adecuada a cada aplicación concreta.

Efecto sobre la calidad del proceso o producto: la ultrafiltración, al actuar en continuo sobre el baño de desengrase, permite el mantenimiento constante de esta solución en óptimas condiciones de trabajo. Por lo tanto, se puede afirmar que mejora la calidad del proceso.

Requisito de espacio: las dos ultrafiltraciones adecuadas a las necesidades de la empresa pueden requerir unos 6 m², aproximadamente.

Tiempo de implantación: desde el momento del pedido, pueden pasar por lo menos dos meses hasta disponer de los equipos, ya que las membranas se tienen que importar; sobre 2-4 días de montaje y unos 5 días más para pruebas y puesta en marcha; en conjunto, pueden pasar unos 2-3 meses.

Requisitos para su utilización: la tecnología de membranas requiere unos controles y mantenimientos que permitan su buen estado; por lo tanto, deberán observarse rigurosamente las indicaciones del fabricante.

Justificación económica de cada opción (en €):

Gastos:

- *Equipos:* 2 equipos x 24.040,48 € c.u. = 48.080,97 €.
- *Instalación:* (incluida en el precio de los equipos)
- *Ingeniería*
- *Servicios*
- *Puesta en funcionamiento:* (incluida en el precio de los equipos)
- *Valor equipo al final vida útil*¹²: 9.616,19 €.
- *Formación*

¹² Considerando una amortización de cinco años.

- *Materias primas:* productos de limpieza de las membranas = 240,40 €/año.
- *Gestión de contaminantes:* 5% de la solución queda como residuo aceitoso = 28.350 l de ultrasonidos/año + 28.350 l de químico/año = 56.700 l/año de solución desengrasante; 56.700 l x 5% = 2.835 l/año de residuo aceitoso; 2.835 l x 0,10 €/l = 283,35 €/año.
- *Operación:* unos 901,52 €/anuales entre mano de obra y electricidad.
- *Mantenimiento:* unos 601,01 €/anuales de mano de obra.
- *Otros*
- **TOTAL INVERSIÓN: 38.464,77 €.**
- **TOTAL COSTES OPERACIÓN: 2.026,29 €/año**

Ingresos:

- *Venta equipos existentes*
- *Incremento precio de venta del producto*
- *Incremento en la producción*
- *Venta y/o valorización de subproductos*
- *Ahorro en materias primas y auxiliares:*
 - 95% de desengrase: 7.212,15 €/año x 95% = 6.851,54 €/año.
 - 95% del agua para preparar el desengrase: (28,35 m³ (cuba ultrasonidos) + 28,35 m³ (cuba químico)) – 1,5 m³ (correspondiente a la parte en sales compradas) = 55,2 m³ ; 55,2 m³ x 95% = 52,44 m³ a 0,7 €/m³ = 36,56 €/año.
- *Ahorro en la gestión de contaminantes:* (28,35 m³ (cuba ultrasonidos) + 28,35 m³ (cuba químico)) x 95% d'ahorro = 53,86 m³ de solución alcalina residual/año; 53.860 kg x 0,10 €/kg = 5.383,22 €/año.
- **TOTAL: 12.271,31 €/año.**

Período de retorno de la inversión: aproximadamente 3,7 años.

DESCRIPCIÓN DE ALTERNATIVAS DE MINIMIZACIÓN

Corriente residual analizada: soluciones alcalinas con aceites residuales.

Alternativa de minimización: reutilización de la solución mediante la introducción de cubas estancas de recuperación.

Opciones de minimización: implantación de dos cubas, una para cada baño de desengrase.

Otras corrientes afectadas: aguas residuales a tratar.

Materias primas afectadas: desengrase por ultrasonidos y desengrase químico.

Procesos o productos afectados: preparación de la superficie metálica.

Posible ahorro en los consumos de materias primas y auxiliares: reducción en un 70% del arrastre de sales y agua procedentes de los desengrasados.

Baño de proceso	Pérdida por arrastre	Ahorro por recuperación (70%)	Total (€/año)
Desengrasados	670,46 l	469,32 l	1,41
Agua de los baños	21,67 m ³	15,17 m ³	10,58
Agua enjuagues posteriores ¹³	485 l/h	388 l/h	1.558,10
TOTAL		1.570,09 €/año	

Tabla 14

Posible reducción de contaminantes: reducción del caudal de agua a depurar:

388 l/h de agua de lavado ahorrados x 5.760 h/año x 0,1 €/l de agua depurada 30.893,37 €/año

(469,32 l de desengrase/año + (15,17 m³ de agua del baño x 1000 l/1 m³)) x 0,1 €/l = 218,18 €/año.

TOTAL: 31.109,55 €/año.

Justificación técnica de cada opción:

Contraste de la tecnología: dado que el tema se ha tratado en repetidas ocasiones a lo largo del presente documento, nos remitimos a los capítulos correspondientes del documento.

Efecto sobre la calidad del proceso o producto: disponer de los medios necesarios para filtrar los aceites del baño; en caso contrario, no se recomienda la alternativa.

Requisito de espacio: dado que se trata de líneas automáticas, cada cuba de recuperación supone transformar la función de algunas de las actuales; por lo tanto, el espacio es el mismo.

Tiempo de implantación: alrededor de un día de montaje.

Requisitos para su utilización: no se requiere ningún condicionante en su utilización; simplemente, se tienen que realizar las mismas operaciones habituales que en el caso del desengrase utilizado. Eso sí, deberán incrementarse los controles analíticos sobre el baño para evitar posibles contaminaciones de aceites.

Justificación económica de cada opción (en €):

Gastos:

- Equipos
- Instalación: 1 operario x 1 día x 8 h x 15,03 €/h = 120,20 €.
- Ingeniería
- Servicios
- Puesta en funcionamiento
- Valor equipo al final vida útil
- Formación

¹³ En este caso, el ahorro de agua viene dado por la reducción en 1/5 parte del caudal de lavado sin recuperación.

-
- *Materias primas*
- *Gestión de contaminantes*
- *Operación: ½ h/día para reintroducir la recuperación a cada baño x 220 días/año*
x 15,03 €/h = 1.652,78 €/año.
- *Mantenimiento*
- *Otros*
- **TOTAL INVERSIÓN: 120,20 €.**
- **TOTAL COSTES DE OPERACIÓN: 1.652,78 €/año.**

Ingresos:

- *Venta equipos existentes*
- *Incremento precio de venta del producto*
- *Incremento en la producción*
- *Venta y/o valorización de subproductos*
- *Ahorro en materias primas y auxiliares: 1.570,09 €/año.*
- *Ahorro en la gestión de contaminantes: 31.109,55 €/año.*
- **TOTAL: 32.679,64 €/año.**

Período de retorno de la inversión: unos dos días.

DESCRIPCIÓN DE ALTERNATIVAS DE MINIMIZACIÓN

Corriente residual analizada: soluciones ácidas con metales del proceso de anodizado.

Alternativa de minimización: reutilización total del baño de anodizado.

Opciones de minimización: implantación de un equipo de retardo iónico.

Otras corrientes afectadas: aguas residuales a tratar.

Materias primas afectadas: ácido sulfúrico de anodizado.

Procesos o productos afectados: ninguno.

Posible ahorro en los consumos de materias primas y auxiliares: ahorro en un 90% aproximado del consumo de ácido sulfúrico y de agua en el baño de anodizado.

Posible reducción de contaminantes: reducción del 90% del caudal de agua ácida con metales a depurar.

Justificación técnica de cada opción:

Efecto sobre la calidad del proceso o producto: Con un nivel bajo de aluminio disuelto, mejora el comportamiento del baño.

Requisito de espacio: sobre 1 m².

Tiempo de implantación: sobre dos días de montaje de conducciones.

Requisitos para su utilización: una vez se haya establecido perfectamente su funcionalidad, no requiere ningún condicionante en su utilización, al margen de las limpiezas periódicas del equipo.

Justificación económica de cada opción (en €):

Gastos:

- *Equipos:* Un equipo para los tres baños de anodizado: unos 36.060,73 €.
- *Instalación:* incluida en el precio del equipo.
- *Ingeniería*
- *Servicios:* 300,51 € en conducciones de PVC.
- *Puesta en funcionamiento*
- *Valor equipo al final vida útil¹⁴:* 721,21 €.
- *Formación*
- *Materias primas*
- *Gestión de contaminantes*
- *Operación:* unas 901,52 €/año (contando el agua y la energía para efectuar el proceso de regeneración).
- *Mantenimiento:* unas 300,51 €/año.
- *Otros*
- **TOTAL: 29.149,09 €.**
- **TOTAL COSTES OPERATIVOS: 1.202,02 €/año.**

Ingresos:

- *Venta equipos existentes*
- *Incremento precio de venta del producto*
- *Incremento en la producción*
- *Venta y/o valorización de subproductos*
- *Ahorro en materias primas y auxiliares:* 90% de ahorro en la compra de ácido sulfúrico: 22.020 l/año x 90% = 19.818 l/año; 19.818 l/año x 0,22 €/l = 42.872,89 €/año.
42,84 m³/año de agua x 90% = 38,55 m³/año; 38,55 m³/año x 0,70 €/m³ = 26,88 €/año.

¹⁴ Considerando una amortización de cinco años.

- Ahorro en la gestión de contaminantes: 22.020 l de ácido + 42.840 l de agua = 64.860 l/año; 64.860 l/año x 90% de ahorro = 58.374 l/año; 58.374 l/año x 0,01 €/l = 806,92 €/año.
- **TOTAL: 5.121,70 €/año.**

Período de retorno de la inversión: aproximadamente 7,4 años.

DESCRIPCIÓN DE ALTERNATIVAS DE MINIMIZACIÓN

Corriente residual analizada: aguas residuales de lavado.

Alternativa de minimización: reutilización del agua de lavado de los baños de anodizado y sellado.

Opciones de minimización: implantación de un equipo de resinas de intercambio iónico.

Otras corrientes afectadas: fangos residuales de depuración de aguas.

Materias primas afectadas: ninguna.

Procesos o productos afectados: etapas de lavado de los procesos de anodizado y sellado.

Posible ahorro en los consumos de materias primas y auxiliares: reducción en un 80% del consumo de agua en estas posiciones de lavado:

Baño de proceso o componente	Lavado sencillo mínimo con caudal (l/h)	Reducción 80% consumo de agua (l/h)	Total ahorro (€/año)
Anodizados	1.940	1.552	6.232,40
Sellados	970	776	3.116,20
TOTALES	2.910	2.328	9.348,60

Tabla 15

Posible reducción de contaminantes: reducción en un 80% del caudal de agua a depurar para estas posiciones de lavado.

Justificación técnica de cada opción:

Contraste de la tecnología: la tecnología de reciclaje de agua mediante resinas de intercambio iónico está implantada con éxito en numerosas empresas del sector.

Efecto sobre la calidad del proceso o producto: el agua de lavado que se obtiene con resinas presenta una conductividad muy baja, lo que favorece el proceso de lavado de piezas. Por lo tanto, se puede afirmar que mejora la calidad del proceso.

Requisito de espacio: un equipo de reciclaje de aguas adecuado a las necesidades de la empresa puede requerir unos 2-3 m², aproximadamente.

Tiempo de implantación: una vez construido el equipo (que puede tardar alrededor de un mes), sobre 1-2 días de montaje y 2-3 días más para pruebas y puesta en marcha.

Requisitos para su utilización: la tecnología de resinas es bastante robusta, no presenta grandes requisitos de mantenimiento ni control; eso sí, hay que evitar el paso por la resina de sustancias orgánicas, como por ejemplo tensoactivos, aceites, etc. o de baños concentrados, especialmente, el baño de anodizado, ya que ello provocaría la inmediata destrucción de la resina.

Justificación económica de cada opción (en €):

Gastos:

- *Equipos:* equipo autoregenerable de unos 500 l de resina, formado por carbón activo, resina catiónica medianamente fuerte y resina aniónica medianamente débil: 33.055,67 €.
- *Instalación:* ya comprendida en el precio del equipo.
- *Ingeniería*
- *Servicios:* conducciones de aguas hasta las cubas de lavado a recircular: 450,76 €.
- *Puesta en funcionamiento:* ya incluida en el precio del equipo .
- *Valor equipo al final vida útil:*¹⁵ 6.611,13 €.
- *Formación*
- *Materias primas:* productos de regeneración de resinas = 120,20 €/año.
- *Gestión de contaminantes:* 10 l de resina por litro se generan como agua residual a tratar en la regeneración: 10 l x 500 l de resina x 2 botellas = 10.000 l; 10.000 l x 0,01 €/l de depuración de aguas y de transporte y gestión de fangos de depuración = 138,23 €/año.
- *Operación:* unas 300,51 €/anuales entre mano de obra y electricidad.
- *Mantenimiento:* unas 240,40 €/anuales de mano de obra.
- *Otros*
- **TOTAL INVERSIÓN: 26.895,29 €.**
- **TOTAL COSTES OPERATIVOS: 799,35 €/año.**

Ingresos:

- *Venta equipos existentes*
- *Incremento precio de venta del producto*
- *Incremento en la producción*
- *Venta y/o valorización de subproductos*

¹⁵ Considerando una amortización de cinco años.

- *Ahorro en materias primas y auxiliares:* los equipos de reciclaje por intercambio iónico permiten una reducción del 80% del consumo de agua para cada posición de lavado implicada: 9.348,60 €/año, según tabla adjunta.
- *Ahorro en la gestión de contaminantes:* 2.328 l/h x 5.760 h/año = 13.409.280 l/año; 13.409.280 l/año x 0,01 €/l x de depuración de aguas y de transporte y gestión de fangos de depuración = 185.360,21 €/año.
- ***TOTAL: 194.708,81 €/año.***

Período de retorno de la inversión: unos 52 días.

7. CONCLUSIONES

En una época en que el objetivo de proteger el medio ambiente a través de las actividades cotidianas del hombre se ha convertido en una necesidad vital para la sociedad, se generan grandes cantidades de corrientes residuales en instalaciones industriales no siempre gestionadas de la forma más idónea para permitir alcanzar un buen nivel de calidad laboral y medioambiental.

El empresario que decide iniciar un proyecto industrial ha de tener en cuenta no sólo los aspectos de producción sino, cada vez más, los factores globalizadores del *input* y el *output* de materias y energía. Su actividad no se encontrará aislada del resto; muy al contrario, formará parte de un “ecosistema” cuya vida dependerá de las actuaciones individualizadas de cada miembro que forma parte del mismo.

El sector de industrias de tratamientos de superficie consume una gran variedad de materias primas, así como unas cantidades de agua importantes en relación con el tamaño de las instalaciones industriales de que dispone. En consecuencia, genera como elementos residuales cantidades destacadas de compuestos que, mal gestionados, ponen en peligro el propio funcionamiento del sistema.

Hasta hace unos años, el industrial de la galvanotecnia consideraba los importantes consumos de materias y de agua como algo imprescindible para el buen acabado de su producción; de hecho, no se trataba de costes demasiado elevados para su economía productiva y así se aseguraba un buen producto final. Con los sistemas de depuración a final de línea, se pensaba disponer de la mejor solución de cara al medio ambiente.

Estos condicionantes son la causa de que existan plantas de proceso galvánico incorrectamente diseñadas y poco adaptadas a las necesidades, presentes o futuras, de las empresas. Además, existía (y todavía puede existir) una visión parcial de la correcta gestión ambiental, que se limitaba a incluir, como continuación de la línea productiva, la instalación correspondiente al tratamiento físicoquímico de las aguas residuales y a gestionar, de acuerdo con la legislación ambiental, los residuos y las emisiones atmosféricas de la industria, sin considerar la posibilidad de disminuir la cantidad de estas corrientes residuales que, si se piensa fríamente, no son más que materias primas y recursos energéticos que no se han transformado en producto acabado, sino que se han de gestionar como corrientes residuales.

Con este documento se han querido dar a conocer, así como poner a disposición de los industriales del sector, orientaciones que permitan conseguir optimizar su proceso productivo de forma que se obtenga una gestión empresarial que integre los conceptos ambientales. Es decir que se consiga la

minimización de las corrientes residuales de una forma coherente con las necesidades de producción y por tanto, de una forma *ecoficiente*.

Considerando el arrastre como la fuente más significativa de pérdida de materias primas y de agua, y también como el principal causante de la mayor parte de aguas residuales y residuos, buena parte de las alternativas tratadas a lo largo del presente estudio se basan en su reducción y recuperación. Así, tanto el capítulo sobre reducción en origen como el de recuperación y reciclaje tienen como principal objetivo actuar sobre el arrastre en la planta galvánica.

Dentro del apartado correspondiente a la reducción en origen de la contaminación, se ha podido ver la sustitución de materias primas y de procesos, la prolongación de la vida de los baños y la reducción de los arrastres como puntos principales. También se ha abordado el aspecto de la introducción de mejoras en los sistemas de enjuague y lavado (lavados en cascada a contracorriente, lavados estancos o ECO, etc.). En lo que concierne a la recuperación y reciclaje en origen, se han tratado aspectos tales como la recuperación de materias primas (desengrase, decapado y productos de aporte), reutilización del agua (mediante equipos de resinas de intercambio iónico y por ósmosis inversa), así como la recuperación de los arrastres (por electrólisis, electrodiálisis, electro-electrodiálisis, ósmosis inversa, ultrafiltración, evaporación e intercambio iónico). Aparte de soluciones relativamente sencillas y poco costosas, se han podido analizar otras posibilidades más elaboradas, con grados de inversión crecientes. Por su importancia y características propias, el apartado correspondiente a las buenas prácticas medioambientales ha merecido un capítulo aparte, así como el capítulo dedicado a las alternativas de tratamiento de efluentes.

Por consiguiente, se puede afirmar que el sector dispone de gran variedad y cantidad de soluciones, de coste también muy variable, ya sea para economizar el consumo de agua y de materias primas, como para reducir la generación de corrientes residuales.

Es recomendable, por lo tanto, realizar un estudio previo para establecer las opciones más adecuadas a cada caso. Este estudio, en esencia, ha de definir los sistemas óptimos de reducción de los consumos, estableciendo las estructuras de proceso, los equipos de recuperación y los sistemas de depuración.

Se trata, en pocas palabras, de *racionalizar* una actividad industrial profesionalmente muy satisfactoria y jalonada de nuevos retos de todo tipo.

8. ALGUNOS EJEMPLOS REALES PARA LAS ALTERNATIVAS PROPUESTAS

A continuación se adjuntan ejemplos concretos de empresas del Mediterráneo que han implementado una o más alternativas de minimización. Estos ejemplos están extraídos de las Fichas Med Clean publicadas por el Centro de Actividad Regional para la Producción Limpia:

Ficha 2. Producción más limpia en un establecimiento del sector de baños galvánicos mediante la adopción de buenas prácticas y cambios en el proceso. Industrias F. Sandoval, S.L. (España).

Ficha 5. Minimización de residuos en un proceso de niquelado químico. Electroless Hoard Coat, S.A. (España).

Ficha 11. Aplicación de la producción más limpia en una industria de accesorios sanitarios. Eczacibasi Yapi Gereçleri. (Turquía).

Ficha 15. Producción más limpia en la industria de la aviación. Israel aviation industry (Israel).

Ficha 16. Producción más limpia en una empresa de tratamiento de superficies. Zincats Industrials Canovelles, S.L. (España).

Ficha 19. Producción limpia en el sector de acabados metálicos para la industria electrónica. ST Microelectronics (Malta).

Ficha 22. Reducción de arrastres en el cromado. Manuel Muños Clarós, S.L. (España).

Ficha 30. Eliminación del tricloroetileno en la fabricación de piezas metálicas. Sasonia de Corte Fino, S.A. (España).

9. BIBLIOGRAFÍA

ADEME. *Étude technique et économique de l'utilisation des solvants dans huit secteurs industriels.* Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie. França. 1995.

AMETLLER, J. *Depuración de efluentes producidos por instalaciones de tratamiento de superficies.* Institut de Tecnologia i Modelització Ambiental. Terrassa. Junio de 1993.

BARA, J-C. *Traîtement de surface. Environnement et compétitivité.* Paris. 1988.

BREUIL, J.N. *Traitement de surface. Depollution a la source.* Cahiers Techniques de la Direction de la Prévention des Pollutions. Ministère de l'Environnement. Paris. 1986.

CORDERES, J. *Estudi i sistematització de les tecnologies de prevenció de la contaminació i producció neta en el sector de banys galvànics.* No publicat. Barcelona, 1999.

DEPARTAMENT DE MEDI AMBIENT. Generalitat de Catalunya. *Galvanotecnia i Medi Ambient. Guia pràctica per a una correcta gestió ambiental a les empreses de galvanotècia.* Barcelona, 1era i 2ª edició 1992 i 1994.

HARTINGER, L. *Handbook of effluent treatment and recycling for the metal finishing industry.* Finishing Publications, Ltd. Wiltshire. 2ª edició. 1994.

KUSHNER, J.B. *Water and waste control for the plating shop.* Gardner Publications, Inc. Ohio. 1976.

NOYES DATA CORPORATION. *Hazardous waste reduction in the metal finishing industry.* PCR Environmental Management, Inc. California. 1989.

OECD. *Managing wastes containing cyanides: guidance document.* Organisation for Economic Co-operation and development. Paris. 1992

UNEP. *Environmental management in the electronics industry. Semiconductor Manufacture and Assembly.* Technical Report nº 23. United Nations Publication. 1ª edició. 1994.

U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. *Guides to pollution prevention. The metal finishing industry.* Ohio. 1992.

10. ENTIDADES Y PERSONAS QUE HAN COLABORADO EN LA ELABORACIÓN DE ESTE INFORME.

A continuación se adjuntan ejemplos concretos de empresas del Mediterráneo que han implementado una o más alternativas de minimización. Estos ejemplos están extraídos de las Fichas Med Clean publicadas por el Centro de Actividad Regional para la Producción Limpia:

- AMBIOMA CONSULT, S.L. (BIOMA)
- EDELAMP, S.A.
- ENTHONE-OMI (ESPAÑA), SA
- ESPAÑOLA DE ELECTRÓLISIS, S.L. (FORPEZ)
- INDUSTRIA GALVÁNICA SAMA, S.A.
- MACDERMID, SA
- SIDASA, SA
- TRELLEBORG AUTOMOTIVE SPAIN, S.A.
- 3 M (ESPAÑA), SA
- USF (ESPAÑA), SA
- Sr. D. Carles Ventura
- Sr. D. José A. Ortega

11. PÁGINAS WEB DE UTILIDAD RELACIONADAS CON EL PROYECTO

<http://www.gencat.es/mediamb/>: web del Departamento de Medio Ambiente de la Generalitat de Cataluña.

<http://www.cema-sa.org>: web del Centro para la Empresa y el Medio Ambiente.

<http://www.epa.gov/>: U.S. Environmental Protection Agency.

<http://www.cygnus-group.com:9011>: reducción de residuos con especial atención a la reducción y reciclaje en origen.

<http://www.euler.berkeley.edu/green/cgdm.html>: información y estudios sobre la producción limpia.

<http://www.acs.org>: la Sociedad Química Americana.

<http://www.envirolink.org>: importante fuente de información ambiental que conecta con muchas otras direcciones de Internet.

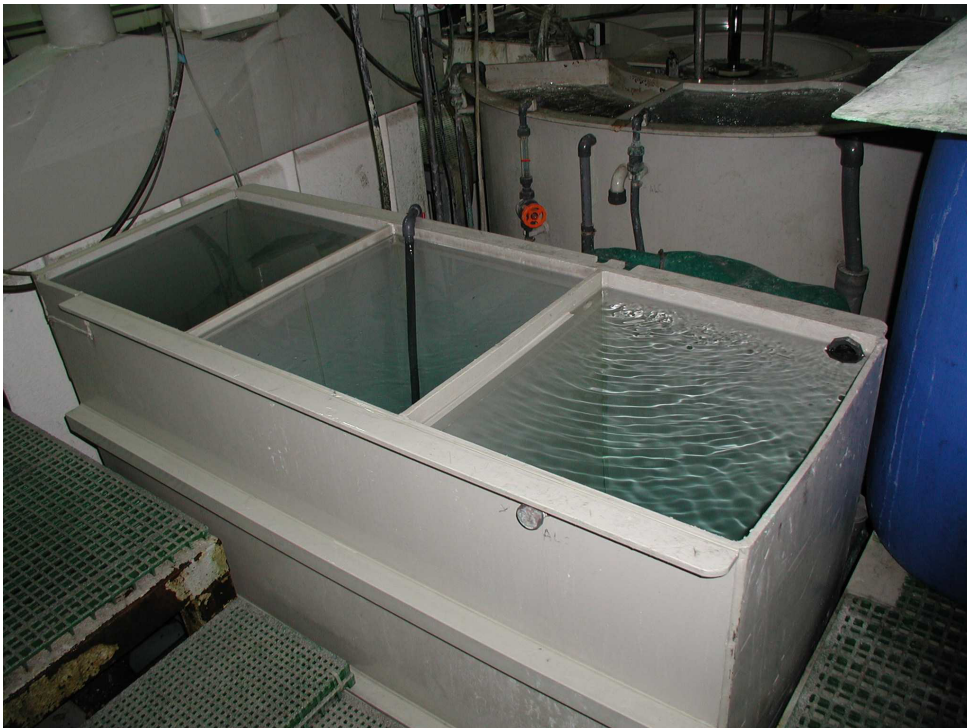
12. FOTOGRAFÍAS SOBRE ALTERNATIVAS DE MINIMIZACIÓN



1 - Equipo de reciclaje de aguas de lavado con resinas de intercambio iónico.



2 - Instalación automática de lavado con autómata programable.



3 – Enjuagado doble en cascada a contracorriente.



4 – Equipo de evaporación al vacío.



5 - Cadena cuelga-bastidores en baños de niquelado.



6 – Ósmosis inversa para agua de red.



7 - Desmineralizador de agua de red.



8 – Instalación de oxidación de cianuros antes de la evaporación de agua residual.



9 – Sedimentador de lamas para concentrar contaminantes antes de la evaporación.



10 – Equipos de filtrado de baños.



11 – Aspiraciones de humos para baños de níquel.



12 - Vista general del corredor con bandejas de recogida de goteos a tierra.