

Proyecto: Integración de tecnologías avanzadas para mejorar la Eficiencia energética y de procesos en empresas con procesos Industriales homogéneos – **EnergíaIndustrial4.0 – E14.0**



Entregable E2.1. - Descripción sector y subsector objetivo

Informe de justificación del sector y subsector objetivo en los cuales se pretende implementar la herramienta a desarrollar

Participantes: AIDIMME e ITE



Título del proyecto:	EnergíaIndustrial4.0
Entregable:	Entregable E2.1

## **ÍNDICE DE CONTENIDO**

<b>Índice de figuras</b>	<b>3</b>
<b>Índice de tablas</b>	<b>4</b>
<b>Tabla de acrónimos empleados</b>	<b>6</b>
<b>1. Introducción</b>	<b>7</b>
<b>2. Procesos y tecnología. Eficiencia de proceso</b>	<b>9</b>
2.1. Técnicas de fabricación en el sector metalmecánico .....	9
2.2. Subsector de Galvanotecnia.....	10
2.3. Técnicas para la eficiencia de proceso y digitalización .....	10
2.4. Criterios de selección y estructuración de las técnicas más relevantes .....	43
2.5. Mapa de tecnologías de digitalización para la eficiencia de proceso .....	65
<b>3. Eficiencia Energética en industria y subsector</b>	<b>67</b>
3.1. Eficiencia Energética en la Industria: Sector Metalmecánico.....	67
3.2. Técnicas para eficiencia y gestión energética en industria .....	69
3.2.1. Gestión energética .....	70
3.2.2. Eficiencia energética en procesos térmicos industriales .....	71
3.2.3. Compensación de energía eléctrica reactiva .....	71
3.2.4. Sistemas de aprovechamiento de la energía solar .....	72
3.2.5. Sistemas de generación de energía eléctrica mini-eólica .....	72
3.2.6. Poligeneración.....	72
3.2.7. Generación distribuida y micro redes .....	73
3.2.8. Hibridación de tecnologías de almacenamiento.....	74
3.2.9. Cambio de tarifa eléctrica .....	75
3.2.10. Compra directa de la energía eléctrica en el mercado eléctrico.....	75
3.2.11. Planificación de la producción (CRP) + técnicas gestión de la demanda....	76
3.2.12. Cálculo y gestión de la huella de carbono .....	76
3.2.13. Herramientas de ayuda a la toma de decisiones .....	77
3.2.14. Gestión compartida de recursos energéticos conjunto de empresas .....	77
3.3. Criterios de selección y estructuración de las técnicas más relevantes .....	78
3.4. Mapa de tecnologías de digitalización para la gestión y eficiencia energética .	79
<b>4. Mapa general de técnicas de industria 4.0 para fabricación y eficiencia energética</b>	<b>86</b>

<b>5. Conclusiones</b>	<b>87</b>
<b>6. Bibliografía</b>	<b>88</b>

## Índice de figuras

<i>Figura 1. Metodología PT2. Fuente: ITE.....</i>	<b>8</b>
<i>Figura 2. Esquema general de los procesos comunes. Fuente: BREF.....</i>	<b>12</b>
<i>Figura 3. Esquema general del proceso electrolítico. Fuente: BREF.....</i>	<b>17</b>
<i>Figura 4. Esquema general de principales acabados sobre níquel. Fuente: BREF.....</i>	<b>21</b>
<i>Figura 5. Esquema recubrimiento metales preciosos. Fuente: BREF.....</i>	<b>28</b>
<i>Figura 6. Esquema metalizado de plástico. Fuente: BREF.....</i>	<b>32</b>
<i>Figura 7. Enjuague múltiple en cascada y contracorriente. Fuente: BREF.....</i>	<b>51</b>
<i>Figura 8. Enjuague ECO. Fuente: BREF.....</i>	<b>53</b>
<i>Figura 9. Técnicas eficiencia de proceso tratamiento superficies. Fuente AIDIMME.....</i>	<b>63</b>
<i>Figura 10. Mapa tecnologías digitales en proceso tratamiento superficies. AIDIMME.....</i>	<b>66</b>
<i>Figura 11. Consumo energético porcentual por sectores industriales. INE.....</i>	<b>68</b>
<i>Figura 12. Metodología de análisis de las técnicas preseleccionadas. ITE.....</i>	<b>70</b>
<i>Figura 13. Esquema genérico de un sistema de poligeneración. Fuente: ITE.....</i>	<b>73</b>
<i>Figura 14. Generación distribuida y microrredes. Fuente: ITE.....</i>	<b>74</b>
<i>Figura 15. Huella de carbono Fuente: Compensaforest.....</i>	<b>77</b>
<i>Figura 16. Mapa técnicas eficiencia según su grado de implantación digital. ITE.....</i>	<b>79</b>
<i>Figura 17. Mapa tecnologías digitales en proceso tratamiento superficies. AIDIMME.....</i>	<b>86</b>
<i>Figura 18. Mapa técnicas eficiencia según su grado de implantación digital. ITE.....</i>	<b>87</b>

## Índice de tablas

<b>Tabla 1. Paquete de Trabajo 2. Fuente propuesta EI4.0</b>	<b>7</b>
<b>Tabla 2. Desengrase con disolventes</b>	<b>13</b>
<b>Tabla 3. Desengrase químico con detergentes</b>	<b>15</b>
<b>Tabla 4. Composición baño de decapado</b>	<b>16</b>
<b>Tabla 5. Composición baño de cinc ácido</b>	<b>18</b>
<b>Tabla 6. Condiciones de trabajo baño de cinc ácido</b>	<b>18</b>
<b>Tabla 7. Composición del baño de cinc alcalino</b>	<b>18</b>
<b>Tabla 8. Condiciones de trabajo baño de cinc alcalino</b>	<b>19</b>
<b>Tabla 9. Composición del baño de cinc cianurado</b>	<b>19</b>
<b>Tabla 10. Condiciones de trabajo baño de cinc cianurado</b>	<b>19</b>
<b>Tabla 11. Composición y operativa de cinc níquel alcalino</b>	<b>20</b>
<b>Tabla 12. Composición y operativa de cinc níquel ácido</b>	<b>20</b>
<b>Tabla 13. Composición y operativa de níquel Watts</b>	<b>22</b>
<b>Tabla 14. Composición y operativa de níquel Wood</b>	<b>22</b>
<b>Tabla 15. Composición y operativa de cobre cianurado</b>	<b>23</b>
<b>Tabla 16. Composición de cobre cianurado gran espesor</b>	<b>23</b>
<b>Tabla 17. Composición y operativa de cobre exento</b>	<b>24</b>
<b>Tabla 18. Composición y operativa de cobre ácido</b>	<b>24</b>
<b>Tabla 19. Composición de baño de latonado</b>	<b>24</b>
<b>Tabla 20. Composición y operativa del baño de bronce</b>	<b>25</b>
<b>Tabla 21. Composición y operativa del baño de cromo brillante</b>	<b>26</b>
<b>Tabla 22. Composición y operativa del baño de cromo trivalente</b>	<b>26</b>
<b>Tabla 23. Composición del baño de cromo duro</b>	<b>26</b>
<b>Tabla 24. Composición del baño de estaño</b>	<b>27</b>
<b>Tabla 25. Composición del baño simple de estaño</b>	<b>27</b>
<b>Tabla 26. Composición y operativa del baño de plata</b>	<b>29</b>
<b>Tabla 27. Composición y operativa del baño de oro</b>	<b>29</b>
<b>Tabla 28. Composición y operativa del baño de paladio</b>	<b>30</b>
<b>Tabla 29. Composición y operativa del baño de rodio</b>	<b>30</b>
<b>Tabla 30. Composición y operativa del baño de platino</b>	<b>31</b>
<b>Tabla 31. Composición baño lavado (metalizado de plástico)</b>	<b>33</b>
<b>Tabla 32. Composición baño mordentado (metalizado de plástico)</b>	<b>33</b>
<b>Tabla 33. Composición baño neutralizado (metalizado de plástico)</b>	<b>33</b>
<b>Tabla 34. Composición baño catalizador (metalizado de plástico)</b>	<b>34</b>



<b>Tabla 35. Composición baño acelerador (metalizado de plástico) .....</b>	<b>34</b>
<b>Tabla 36. Composición baño de níquel químico (metalizado de plástico).....</b>	<b>34</b>
<b>Tabla 37 Composición baño de anodizado de aluminio con ácido sulfúrico .....</b>	<b>35</b>
<b>Tabla 38. Composición baño de anodizado de aluminio con ácido crómico .....</b>	<b>35</b>
<b>Tabla 39. Composición del lacado electrolítico .....</b>	<b>37</b>
<b>Tabla 40. Composición del baño de níquel químico sobre metales .....</b>	<b>37</b>
<b>Tabla 41. Composición del baño de níquel autocatalítico para plásticos.....</b>	<b>38</b>
<b>Tabla 42. Composición del baño de pasivado azul .....</b>	<b>39</b>
<b>Tabla 43. Composición del baño de pasivado verde.....</b>	<b>39</b>
<b>Tabla 44. Composición del baño de pasivado amarillo .....</b>	<b>40</b>
<b>Tabla 45. Composición del baño de pasivado negro .....</b>	<b>40</b>
<b>Tabla 46. Composición del baño de sellado.....</b>	<b>40</b>
<b>Tabla 47. Otros baños de sellado .....</b>	<b>40</b>
<b>Tabla 48. Desniquelado químico.....</b>	<b>42</b>
<b>Tabla 49. Desniquelado electrolítico .....</b>	<b>42</b>
<b>Tabla 50. Composición de baño de descromado.....</b>	<b>43</b>
<b>Tabla 51. Ventajas e inconvenientes en tipos de tratamiento. Fuente AIDIMME .....</b>	<b>64</b>
<b>Tabla 52. Clasificación individual técnicas seleccionadas. Fuente ITE .....</b>	<b>69</b>



## Tabla de acrónimos empleados

Se procede a definir aquellos acrónimos empleados a lo largo del documento, por orden de aparición:

- PYME: Pequeña y mediana empresa
- INE: Instituto Nacional de Estadística
- ATEG: Asociación técnica española de galvanización
- SGE: Sistema de gestión energética
- ACS : Agua caliente sanitaria
- GEI: Fases de efecto de invernadero
- OMIE: Operación del Mercado Ibérico de Energía.
- ERP: *Enterprise resource planning* o sistemas de planificación de recursos empresariales
- CRP: *Capacity resource planning* o sistemas de planificación de requerimientos de capacidad
- KPI: *Key performance indicator*
- EERR: Energías renovables
- IDE: Indicador de desempeño energético
- I+D: Investigación y desarrollo
- BMS: Building management system

## 1. Introducción

El entregable E2.1 cubre tareas del paquete de trabajo 2:

FICHAS DESCRIPTIVAS DE LOS PAQUETES DE TRABAJO			
Paquete de trabajo Nº	2	Fecha de comienzo: M01, abr 2017	Fecha de fin: M08, nov 2017
Responsable del paquete de trabajo*:	ITE		
Acrónimos otros participantes en este paquete de trabajo*:	AIDIMME		
Título del paquete de trabajo	PT2 - Análisis, especificaciones y diseño		
<b>Objetivos:</b>	<p>El objetivo de este paquete de trabajo es el de definir en detalle las especificaciones y diseño de la herramienta de auto diagnóstico digital e interactiva propuesta en el proyecto, en el ámbito del sector metal, subsector del <i>Tratamiento y revestimiento de metales</i>.</p> <p>Para ello se definirán de manera iterativa las funcionalidades, especificaciones y diseño de sistema hasta tener a su finalización una versión definitiva de la herramienta. Con el fin que en los siguientes paquetes de trabajo PT3 y PT4 el inicio de su desarrollo.</p>		
<b>Descripción del trabajo (tareas):</b>	<p><b>T2.1 – Caracterización de subsector, especificaciones iniciales y mapas interactivos (M1-M6) – (ITE, AIDIMME)</b>                      En esta tarea se desarrollarán las especificaciones iniciales de sistema, para ello se realizarán las siguientes acciones:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Caracterización de necesidades del subsector objetivo según sus plantas productivas y procesos determinando mejoras de eficiencia de procesos, eficiencia energética y de digitalización.</li> <li>- Desarrollo de mapas de tecnologías aplicables en cuanto a mejoras de eficiencia de procesos, eficiencia energética y digitalización.</li> <li>- Desarrollo de metodología de análisis y cuantificación de estado de empresas y planes de mejora</li> <li>- Diseño de lógica de mapas interactivo de tecnologías y cuantificación automática de estado y planes de mejora</li> </ul> <p><b>T2.2 – Especificaciones finales y diseño de sistema (M3-M8) – (ITE, AIDIMME)</b>                      En esta tarea se desarrollarán las especificaciones avanzadas y finales del sistema, para ello se realizarán las siguientes acciones:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Definición de funcionalidades y arquitectura de herramienta de análisis web y sistema de recogida de información</li> <li>- Diseño de herramienta de análisis web y sistema de recogida</li> <li>- Ajuste final de lógica desarrollada</li> <li>- Especificaciones, funcionalidades, diseño final.</li> </ul> <p>Con ello el sistema propuesto estará preparado para su desarrollo en siguientes paquetes de trabajo.</p>		
<b>Entregables:</b>	E2.1 - Descripción sector y subsector objetivo E2.2 – HAO especificaciones y diseño herramienta		
<b>Hitos:</b>	H2.1 – HAO, especificadores iniciales , mapas interactivos desarrollados H2.2 – HAO, especificaciones finales y diseño realizado		
<b>Reuniones:</b>	Desde inicio a fin de paquete de trabajo entre ITE y AIDIMME reuniones quincenales y con FEMEVAL mensuales. Objetivo de las primeras son la organización técnica del desarrollo de tareas y con FEMEVAL organización de cara a enfocar la herramienta adecuadamente al sector y subsector objetivo.		

Tabla 1. Paquete de Trabajo 2. Fuente propuesta EI4.0

La ejecución del trabajo se ha realizado siguiendo la siguiente metodología:

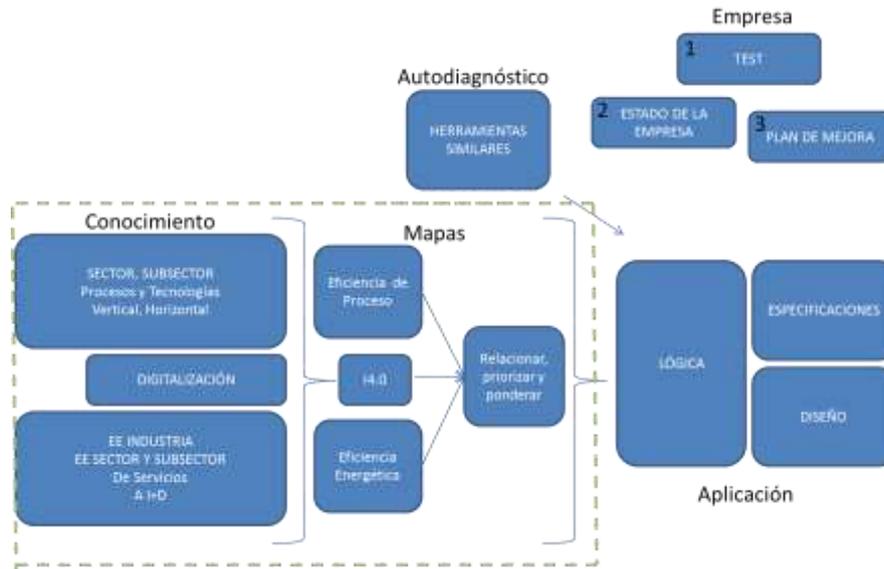


Figura 1. Metodología PT2. Fuente: ITE.

Dividiendo las acciones a realizar en este paquete de trabajo respecto a:

- **Conocimiento** – Se han desarrollado tareas de búsqueda bibliográfica con el objetivo de agrupar una serie de técnicas digitalizables que ayuden a resolver la herramienta que se pretende en este proyecto, tanto a nivel de procesos y tecnologías utilizadas en el sector y subsector objetivo, como a nivel de eficiencia energética. AIDDIME se ha centrado en la parte de proceso y tecnologías, e ITE en la de Eficiencia Energética.
- **Mapas** – Con las técnicas recopiladas, se han definido unos mapas en los cuáles se han especificado las técnicas más importantes y se han clasificado desde servicios básicos a proyectos I+D de manera horizontal, desglosándose también a nivel vertical. Se han generado dos mapas, uno de Eficiencia de Proceso y otro de Eficiencia Energética con el objetivo de compararlos y poder priorizar y ponderar cada una de las técnicas finalmente establecidas.
- **Autodiagnóstico** – Análisis de herramientas existentes con funcionalidades similares, de manera que puedan servir como referencia y punto de partida, así como para detectar deficiencias y poder eliminarlas en el desarrollo de este proyecto. Se puede afirmar que no existe en el mercado ninguna herramienta con las funcionalidades de la que se pretende obtener en este proyecto.
- **Empresa** – Se ha definido un test de preguntas basadas en industria 4.0 y relacionadas con las diferentes técnicas seleccionadas, mediante las cuales se pretende saber el estado de las empresas (grado de adaptación) en cuanto al concepto de Industria 4.0 y proponerles un plan de mejora a seguir.
- **Aplicación** – realización del diseño de la herramienta, se han definido unas especificaciones a seguir considerando los mapas realizados y los datos aportados por las empresas. Siguiendo estas especificaciones se ha implementado la herramienta a nivel de programación.

En este informe, y siguiendo esta metodología planteada, se han trabajado las partes de Conocimiento y Mapas.

## 2. Procesos y tecnología. Eficiencia de proceso

En este apartado se ha realizado una revisión sobre los procesos del subsector del galvanizado, y poder así definir con un mayor grado de detalle las diferentes técnicas o métodos de gestión relacionadas con la eficiencia de procesos que se pretende seleccionar y ordenar en este entregable.

### 2.1. Técnicas de fabricación en el sector metalmeccánico

La industria metalmeccánica se engloba dentro del CNAE 25 "Fabricación de productos metálicos, excepto maquinaria y equipo", es un sector estratégico de la economía valenciana, donde la ocupación representa el 24,5% del empleo industrial con más de 75.000 trabajadores. Considerando todo el sector del metal es el mayor contribuyente manufacturero al PIB con un 25%, aproximadamente, y un tercio de las exportaciones, aunque estos números están influenciados por el peso de la automoción.

Con más de 5.000 empresas suponen el 20% del total de empresas industriales, y de las que más del 80% son PYMES, un 13% multinacionales de capital nacional y el 6% restante de capital extranjero.

El subsector de tratamiento y revestimiento de superficies, se corresponde con el CNAE 25.61, y comprende un conjunto de procesos en los que se produce una modificación estructural de una superficie de metal o de plástico variando las características del mismo, tanto desde el punto de vista del acabado como de la resistencia a la corrosión, envejecimiento, etc. Dicho subsector puede comprender:

- el revestimiento metálico del metal (galvanizado, anodizado, cromado, cincado,..),
- el recubrimiento con metales preciosos,
- el tratamiento térmico del metal,
- el revestimiento no metálico del metal (pintado, lacado, esmaltado, plastificación....),
- grabado e impresión,
- técnicas de pretratamiento y lavado del metal (fosfatado, chorreado, etc.), endurecimiento, pulido,
- y diversas técnicas de limpieza.

Estos procesos aparecen frecuentemente en forma de subprocesos, en el interior de la empresa o en forma de subcontratación, en un gran número de industrias de sectores diversos. Así podemos encontrarlos en la industria del automóvil, aeronáutica,



sistemas de telecomunicación y de la información, construcción, fabricación de electrodomésticos y utensilios, etc.

La zona del Levante representa el 13% del volumen total nacional de producción, siendo los subsectores Ni-Cr con 22%, metales preciosos con 18%, anodizado de Al con 16%, los más significativos.

## 2.2. Subsector de Galvanotecnia

El subsector de Galvanotecnia dentro del tratamiento de superficies está conformado en general por pequeñas y medianas empresas, representando en la Comunidad valenciana el 13% del volumen nacional.

Como se ha comentado el subsector puede a su vez subdividirse en un conjunto de subprocesos. La descripción del sector se realizará según la siguiente clasificación de estos subprocesos:

- Cinc
- Níquel electrolítico
- Cobre
- Latón y bronce
- Cromo decorativo y duro
- Estaño
- Metales preciosos
- Metalizado de plásticos
- Anodizado de aluminio
- Lacado electrolítico
- Níquel químico
- Fosfatado
- Pasivado
- Sellado
- Lavado
- Secado
- Desmetalizado

## 2.3. Técnicas para la eficiencia de proceso y digitalización

La mayoría de las empresas que se dedican a la Galvanotecnia en la Comunidad Valenciana son empresas de servicios, que aplican recubrimientos a piezas fabricadas por terceros.



Los procesos de tratamiento de superficie desarrollados en la Industria de Galvanotecnia consisten en la alteración de las propiedades de la superficie mediante la deposición electrolítica o química de capas metálicas u orgánicas sobre la misma, o mediante su conversión química.

Las reacciones que tienen lugar en la superficie, sea metálica o de plástico, son del tipo de oxidación-reducción, pudiéndose encontrar:

- Procesos electrolíticos (por electrodeposición o conversión): se producen mediante la incorporación de una corriente eléctrica externa
- Procesos químicos o autocatalíticos (por deposición o conversión): tienen lugar sin la incorporación de ninguna corriente eléctrica externa

Las reacciones que tienen lugar sobre las superficies metálicas modifican las características superficiales de estas variando sus propiedades. Estas propiedades pueden ser:

- Decorativas: mejorando el aspecto de la superficie
- De protección: confiriendo a la superficies una dureza mayor y una resistencia a la corrosión mejorada
- Funcionales: en orden a facilitar el manejo y la utilización de las piezas en procesos posteriores.

Con respecto a las piezas de material plástico, cuya utilización es creciente en nuestros días dada su facilidad en la fabricación y a la posibilidad de que sean tanto flexibles como rígidas, no tienen las propiedades de las superficies metálicas, por lo que su tratamiento se enfoca hacia:

- La obtención de un acabado decorativo (cromo, latón, cobre, oro, etc) de mayor valor
- La obtención de una superficie más dura que la del plástico
- La obtención de una superficie conductora de la electricidad.

El tamaño y complejidad de las instalaciones de tratamiento de superficies es función de:

- El proceso de tratamiento a aplicar.
- La calidad de los acabados que se desea obtener
- Las características de las piezas en cuanto a tamaño, tipo, forma, material, cantidad, etc.
- Las necesidades de logística y manipulación de las piezas.

Todas estas variables determinarán el carácter de las instalaciones en cuanto a si estas deben ser manuales o automáticas y si para la manipulación y transporte de las piezas es necesario usar bastidores o bombos.

Existe un esquema general de los procesos común a la mayor parte de los tratamientos independientemente de la mayor o menor complejidad de los mismos. Este esquema es el que se muestra a continuación:

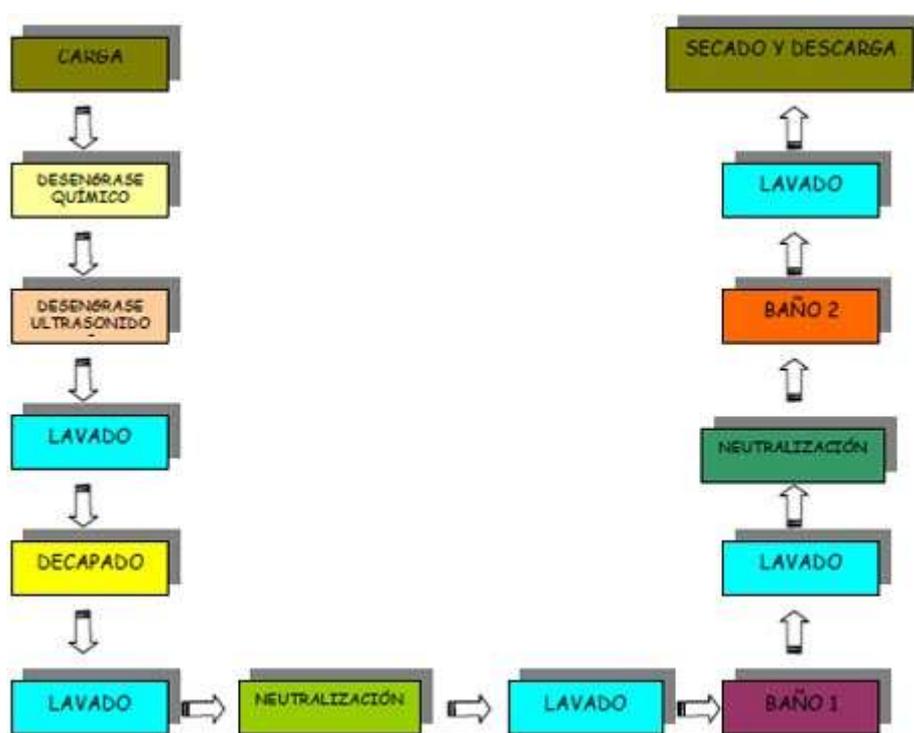


Figura 2. Esquema general de los procesos comunes. Fuente: BREF

### 2.3.1. Pretratamientos

En cualquier proceso galvánico, como paso previo al recubrimiento de la superficie de es preciso realizar un tratamiento de preparación de la misma. El objeto de los pretratamientos es la eliminación de los contaminantes que ensucian la superficie como aceites, grasas, óxidos, cascarillas, restos de taladrinas y otros productos como agentes lubricantes y de refrigeración, que pueden dificultar la deposición correcta de los metales sobre la superficie.

Los pretratamientos se pueden englobar en dos grandes grupos:

- Pretratamientos mecánicos.
- Pretratamientos químicos.

### 2.3.1.1. Pretratamientos mecánicos

En los pretratamientos mecánicos se realiza un pulido de la superficie a tratar con medios mecánicos como cintas abrasivas o tratamientos en masa por vibración. También se utilizan sistemas de proyección mediante los cuales, con el auxilio de aire comprimido, se hace impactar materiales abrasivos como sílice, bolas de acero inoxidable, etc, sobre la superficie de la piezas. De esta forma se eliminan físicamente las capas de suciedad e impurezas adheridas fuertemente a la superficie.

### 2.3.1.2. Pretratamientos químicos

#### 2.3.1.2.1. Desengrase químico con solventes

Los solventes utilizados para el desengrase química pueden utilizarse en frío o en su fase vapor. Son particularmente eficaces en la eliminación de aceites y grasas y capas de pintura y barniz.

- Aplicación por inmersión en frío: tiene lugar por inmersión de la pieza en el disolvente en fase líquida en la cual se aprovechan las propiedades desengrasantes del propio disolvente.
- Aplicación en fase vapor: aplicando calefacción al disolvente este se evapora y al contactar con la superficie de la pieza condensa en la misma y disuelve y arrastra al mismo tiempo las grasas de la superficie.

Desengrasante	Tipo tratamiento	Productos más utilizados	Materia eliminada
Disolventes	En frío	tricloroetano, tricloroetileno y percloroetileno, cloruro de metileno	grasas, pinturas y barnices
	Fase vapor	triclorofluoretano,	

Tabla 2. Desengrase con disolventes. Fuente: BREF



### **2.3.1.2.2. Desengrase químico con detergentes**

Los desengrases químicos con detergentes incluyen compuestos alcalinos que eliminan las grasas por saponificación de las mismas y tensioactivos que separan los glóbulos de aceite bajando la tensión superficial y capturándolos en estructuras micelares.

El desengrase químico con detergentes se puede aplicar de distintas formas:

- Desengrase químico

El desengrase se produce por mecanismos puramente químicos como los descritos en los cuales para favorecer mecánicamente la limpieza, se agita el medio por agitación mecánica o por aire.

- Desengrase por ultrasonidos

El desengrase por ultrasonidos incorpora a los procesos químicos descritos un generador de ultrasonidos el cual, por el efecto de cavitación, crea un elevado número de microburbujas en la superficie de las piezas que explotan a gran presión creando un efecto de impacto que elimina mecánicamente la suciedad de la superficie de las piezas.

- Desengrase electrolítico

El desengrase electrolítico también tiene una formulación similar a la del desengrase químico pero en este caso se aplica una corriente eléctrica a la superficie de las piezas haciéndola catódica u anódica. Dicha corriente eléctrica electroliza el agua originando burbujas hidrógeno u oxígeno en la superficie las cuales arrancan y arrastran las grasas presentes. También pueden eliminarse de esta forma los óxidos metálicos que se encuentren mediante su reducción por el hidrógeno molecular.

En la tabla siguiente se relacionan compuestos químicos frecuentemente usados en los procesos de desengrase descritos:

Desengrasante	Tipo tratamiento	Composición y Condiciones de trabajo		Materia eliminada
		Productos	concentración	
Solución alcalina con detergentes	Desengrase Químico y Desengrase Químico por Ultrasonidos	sosa cáustica	40 g/l	cualquier tipo de grasa
		carbonato sódico	25 g/l	
		fosfato trisódico	10 g/l	
		metasilicato sódico	10 g/l	
		humectantes/ tensioactivos	2-5 g/l	
		complejantes metálicos	Variable	
		pH	12-14	
		temperatura	60-90 °C	
	Desengrase Electrolytico	Productos	concentración	
		sosa cáustica	50-60 g/l	
		fosfato trisódico	10-20 g/l	
		gluconato sódico	10-30 g/l	
		pH	12-14	
		temperatura	80 °C	
	densidad de corriente	5-10 Amp/dm <sup>2</sup>		

Tabla 3. Desengrase químico con detergentes. Fuente BREF

### 2.3.1.3. Decapado

El objeto de los procesos de decapado es la eliminación de la superficie de los óxidos metálicos que se puedan encontrar. Tal eliminación se realiza mediante la inmersión de la pieza en soluciones ácidas. De esta forma la superficie queda activa para recibir sin problemas los procesos posteriores, sean estos recubrimientos o tratamientos químicos.

Los principales ácidos que se utilizan en esta operación son los siguientes.

Decapante	Composición y Condiciones de trabajo	Materia eliminada
Ácido sulfúrico	Concentración : 25 %	Óxidos metálicos
	Temperatura: 60 °C	
Ácido clorhídrico	Concentración : 18-22 %	
	Temperatura: 30-35 °C	
Ácido fluorhídrico	Concentración : 20-25 %	
	Temperatura: 35-40 °C	
Ácido nítrico	Concentración: 10 %	
	Temperatura: 68-79 °C	

Tabla 4. Composición baño de decapado. Fuente BREF

Los compuestos químicos que pudieran quedar en superficie como consecuencia del decapado, tales como sales o restos de ácidos, deben ser eliminados posteriormente por medio de una neutralización y posterior enjuague con agua limpia.

## 2.3.2. Tratamientos de superficie aplicados

### 2.3.2.1. Tratamientos electrolíticos principales

Los procesos electrolíticos permiten la modificación de las características de la superficie de las piezas mediante la conversión química de la misma o mediante la electrodeposición de metales. Ambos mecanismos dotarán a la pieza de las deseadas propiedades funcionales, de resistencia a la corrosión, y decorativos. Los elementos involucrados en todo proceso electrolítico son:

- disolución electrolítica
- electrodos de material conductor
- corriente eléctrica.

A continuación se expone un esquema general de un proceso electrolítico:

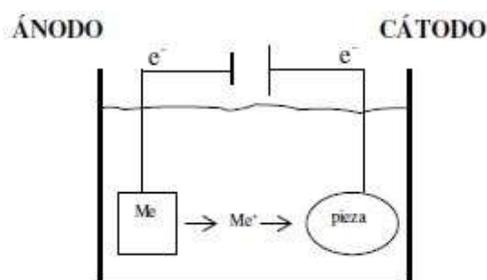


Figura 3. Esquema general del proceso electrolítico. Fuente: BREF

En la práctica, para la obtención de un recubrimiento electrolítico se sumerge la pieza a recubrir en una solución que contiene el metal a depositar en forma iónica. La pieza se hace catódica mediante la aplicación de una corriente eléctrica continua. Por lo general el ánodo está compuesto por el mismo metal que se quiere depositar de tal forma que se asegure una constancia en la concentración de iones metálicos en la disolución.

Los procesos electrolíticos más frecuentes son:

- Cinc
- Níquel
- Cobre
- Latón y bronce
- Cromo decorativo y duro
- Estaño
- Metales preciosos
- Metalizado de plástico
- Anodizado de aluminio

### 2.3.2.1.1. Cinc

Generalmente el cinc precisa un tratamiento posterior del recubrimiento para asegurar la adecuada resistencia a la corrosión. Este tratamiento posterior suele ser un pasivado por medio de un tratamiento en soluciones formuladas con sales de cromo hexavalente o trivalente.

- Cinc ácido

Se utiliza para piezas que precisan de un acabado muy brillante donde los requerimientos de penetración y distribución del metal no son muy elevados. También se utiliza para aceros difíciles de tratar como carbonitrurados y sometidos a tratamientos térmicos.

Se formula con la siguiente composición:

PRODUCTO	CONCENTRACIÓN
cloruro de cinc	60-100 g/l
cloruro de potasio	130-180 g/l
ácido bórico	15-30 g/l
aditivos	Sí

Tabla 5. Composición baño de cinc ácido., Fuente BREF

Siendo las condiciones operativas del proceso las siguientes:

temperatura	21-35 °C
densidad de corriente	1-4 Amp/dm <sup>2</sup>
tensión	1-12 V
pH	4,8-5,5

Tabla 6. Condiciones de trabajo baño de cinc ácido. Fuente BREF

- Cinc alcalino

Se utiliza para piezas metálicas a las que se debe aportar una resistencia a la corrosión, en las que las exigencias de penetración y distribución sean superiores al proceso anterior. Requiere un desengrase cuidadosa para asegurar la calidad del recubrimiento.

Se formula con la siguiente composición:

PRODUCTO	CONCENTRACIÓN
óxido de cinc	5-15 g/l
Hidróxido de sodio o potasio	100-150 g/l

Tabla 7. Composición del baño de cinc alcalino. Fuente BREF

Siendo las condiciones operativas del proceso las siguientes:

temperatura	20-35 °C
densidad de corriente	1-4 Amp/dm <sup>2</sup>
tensión	2-15 V

Tabla 8. Condiciones de trabajo baño de cinc alcalino. Fuente BREF

- Cinc cianurado

Es de características similares al cinc alcalino pero sin las exigencias tan elevadas de desengrase previo. Proporciona una excelente penetración y reparto. Cada vez se utiliza menos debido al carácter altamente tóxico del cianuro, tanto desde el punto de vistas medioambiental como el de seguridad y salud.

Se formula con la siguiente composición:

PRODUCTO	CONCENTRACIÓN
óxido de cinc	10-43 g/l
hidróxido de sodio	50-75 g/l
cianuro de sodio	5-100 g/l

Tabla 9. Composición del baño de cinc cianurado. Fuente BREF

Siendo las condiciones operativas del proceso las siguientes:

temperatura	20-30 °C
densidad de corriente	2-6 Amp/dm <sup>2</sup>
tensión	2-15 V

Tabla 10. Condiciones de trabajo baño de cinc cianurado. Fuente BREF.

- Aleaciones de cinc

Son cada vez más utilizadas en el sector de automoción debido a la excelente protección contra la corrosión que proporcionan. Las más frecuentes son las siguientes:

- cinc-hierro (< 1% Fe).

- cinc-cobalto (< 3% Co).
- cinc-níquel (< 15% Ni).

Las aleaciones de cinc-níquel son las que presentan mayor grado de implantación, proporcionando una resistencia a la corrosión 10 veces mayor que la del cinc sin alear.

Existen formulaciones de base alcalina y de base ácida, siendo sus características en cuanto a penetración, reparto y brillo similares a las de cinc. Estas se muestran a continuación:

PRODUCTO	CONCENTRACIÓN
Óxido de cinc	8-12 g/l
Hidróxido sódico	120-150 g/l
Níquel	1-1.5 g/l
Carbonato sódico	10-70 g/l
Aditivos	Sí
Temperatura	25-29 °C
Densidad de corriente	1-5 Amp/dm <sup>2</sup>

Tabla 11. Composición y operativa de cinc níquel alcalino. Fuente BREF

PRODUCTO	CONCENTRACIÓN
Cloruro de cinc	95-145 g/l
Cloruro de níquel	130-190 g/l
Cloruro potásico	210-260 g/l
Ácido bórico	15-25 g/l
Aditivos	Sí
pH	5.3-5.5
Temperatura	35-37 °C
Densidad de corriente	2-4 Amp/dm <sup>2</sup>

Tabla 12. Composición y operativa de cinc níquel ácido. Fuente BREF

- Postratamientos

Todos los procesos de cincado van acompañados de un tratamiento posterior en orden a elevar su resistencia a la corrosión. Este postratamiento consiste en una pasivación que se formula con sales de cromo trivalente o hexavalente (aunque recientemente se están desarrollando pasivados exentos de cromo). Existen cuatro tipos generales de pasivado con diferentes grados de protección:

- pasivado azul (baja resistencia a la corrosión).
- pasivado verde (elevada resistencia a la corrosión).
- pasivado amarillo (elevada resistencia a la corrosión).
- pasivado negro (media resistencia a la corrosión).

### 2.3.2.1.2. Níquel electrolítico

En gran parte de los acabados superficiales, sea con fines de protección contra la corrosión como puramente decorativos, antes del recubrimiento que proporciona el aspecto final se deposita una capa previa de níquel, la cual favorece dicha protección contra la corrosión y dota del brillo y nivelación que se requiere al acabo final. Este subcapa se utiliza tanto para hierro, como aluminio, latón, cobre y aleaciones de cinc como el zámak.

Los principales acabados que se utilizan como capa previa de níquel son los siguientes:

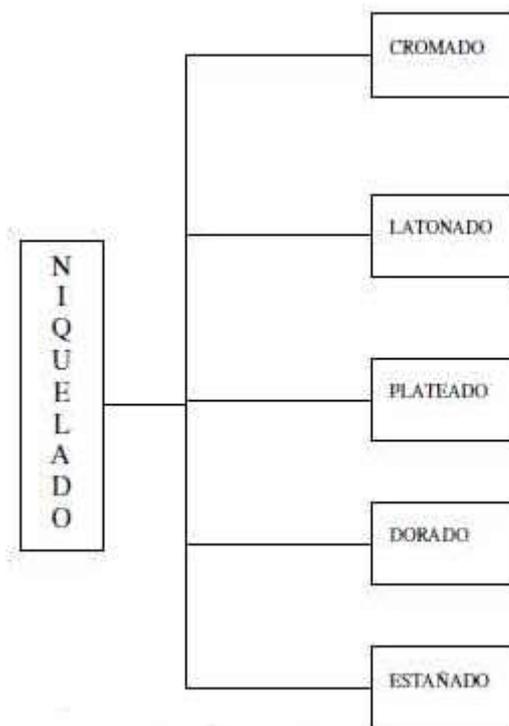


Figura 4. Esquema general de principales acabados sobre níquel. Fuente: BREF



- Níquel Watts

La formulación más utilizada de un baño de níquel recibe la denominación de Níquel Watts:

PRODUCTO	CONCENTRACIÓN
sulfato de níquel 7·H <sub>2</sub> O	90-375 g/l
cloruro de níquel 6·H <sub>2</sub> O	200-100 g/l
ácido bórico	30-45 g/l
temperatura	50-65 °C
densidad de corriente	1-8 Amp/dm <sup>2</sup>
pH	3,5-4,5
tensión	1-15 V

Tabla 13. Composición y operativa de níquel Watts. Fuente BREF

Para evitar la formación de picaduras provocadas por las burbujas de hidrógeno generados en la superficie de la pieza se añaden humectantes, que reducen la tensión superficial, así como otros aditivos que tienen influencia sobre la estructura del metal depositado y, por consiguiente sobre el aspecto final (brillante, semibrillante, mate, satinado)

- Níquel Wood

La composición del baño, utilizado sobre superficies especialmente muy pasivas, es la siguiente:

PRODUCTO	CONCENTRACIÓN
cloruro de níquel 6·H <sub>2</sub> O	240 g/l
ácido clorhídrico	125 ml / l
temperatura	20-30 °C

Tabla 14. Composición y operativa de níquel Wood. Fuente BREF

### 2.3.2.1.3. Cobre

Los distintos tipos de baños de cobre que se encuentran en las industrias son:

- Cobre cianurado

Se formula con la siguiente composición:

PRODUCTO	CONCENTRACIÓN
cianuro de cobre	15-42 g/l
cianuro de sodio	24-52 g/l
carbonato sódico	15 g/l
hidróxido sódico	control pH
temperatura	30-65 °C
densidad de corriente	1-1,5 Amp/dm <sup>2</sup>
pH	10-12,6
ánodos	cobre electrolítico y acero

Tabla 15. Composición y operativa de cobre cianurado. Fuente BREF

El espesor obtenido con esta formulación se encuentra 2-3  $\mu\text{m}$ .

Cuando se requieren espesores mayores entre 6-8  $\mu\text{m}$ , y cuando se requiere trabajar a bombo o tambor, se usa la siguiente formulación:

PRODUCTO	CONCENTRACIÓN
cianuro de cobre	25-50 g/l
cianuro potasio	50-100 g/l
hidróxido potásico	7.5-15 g/l

Tabla 16. Composición de cobre cianurado gran espesor. Fuente BREF

Otro tipo de baño muy utilizado es el que utiliza cianuro de cobre (40-60 g/l) y cianuro de sodio o potasio con sal de Rochelle (tartrato de sodio y potasio).

Con el tiempo, estos baños se cargan progresivamente con carbonato de potasio, el cual, cuando se alcanzan concentraciones intempestivas (90 g/l), ralentizan la deposición del metal reduciendo el rendimiento electrolítico y producen acabados ásperos.

- Cobre alcalino exento de cianuros

Esta formulación se ha desarrollado para eliminar el cianuro tóxica de las anteriores formulaciones, presentando la composición y condiciones operativas siguientes:

PRODUCTO	CONCENTRACIÓN
pirofosfato de cobre	345,0 g/l
hidróxido potásico	18,0 g/l
amonio	1 ml/l
temperatura	43-60 °C
densidad de corriente	1-7,5 Amp/dm <sup>2</sup>
pH	8,2-9,2
ánodos	cobre electrolítico

Tabla 17. Composición y operativa de cobre exento

- Cobre ácido

Es un baño de utilización muy frecuente como paso previo a los procesos de níquel y cromo debido a su alta capacidad de nivelación.

Se formula con la siguiente composición:

PRODUCTO	CONCENTRACIÓN
sulfato de cobre	180-250 g/l
ácido sulfúrico	60-90 g/l
Cloruros	60-120 mg/l
temperatura	253 °C
densidad de corriente	2-10 Amp/dm <sup>2</sup>
ánodos	cobre fosforoso

Tabla 18. Composición y operativa de cobre ácido

#### 2.3.2.1.4. Latón y bronce

- Latón

Se utiliza con fines fundamentalmente decorativos, formulándose con la siguiente composición:

PRODUCTO	CONCENTRACIÓN
cianuro de cobre	8-15 g/l
cianuro de cinc	5-30 g/l
cianuro de sodio	70-90 g/l
pH	10

Tabla 19. Composición de baño de latonado. Fuente BREF



- Bronce

Es una acabado cada vez más utilizado en aplicaciones decorativas de bisutería y joyería, fundamentalmente en sustitución de las subcapas de níquel para prevenir las alergias provocadas por este metal. El recubrimiento puede ser amarillo o blanco en función de las concentraciones relativas de estaño, cobre y cinc.

El baño se formula según la siguiente composición:

PRODUCTO	CONCENTRACIÓN
estannato potásico	5-20 g/l
cianuro de cobre	30-45 g/l
cianuro de zinc	6-10 g/l
cianuro de potasio	90-120 g/l
temperatura	30-50 °C
densidad de corriente	0,5 -5 Amp/dm <sup>2</sup>
pH	9,5-11,5
ánodos Cu-Zn	60-80 %Cu, 20-40 %Zn

Tabla 20. Composición y operativa del baño de bronce. Fuente BREF.

### 2.3.2.1.5. Cromo decorativo y duro.

Los recubrimientos de cromo tienen unas características de resistencia a la corrosión, aspecto y dureza que hacen que sean ampliamente utilizados tanto en aplicaciones decorativas (cromo brillante y cromo negro) como en aplicaciones industriales con altas exigencias mecánicas y de dureza (cromo duro). También se utilizan las sales de cromo, como se ha visto, para los procesos de pasivación y de decapado ácido.

- Cromo decorativo

Se aplican capas de pequeño espesor (0,1-0,4 µm) después de una subcapa de níquel, pudiéndose utilizar formulaciones tanto con cromo hexavalente como con cromo trivalente.

La formulación decorativa más convencional, que utiliza cromo hexavalente, es la siguiente:

Ç

PRODUCTO	CONCENTRACIÓN
ácido crómico	80-400 g/l
ácido sulfúrico	0,8-4 g/l
temperatura	40-50 °C
densidad de corriente	5 -55 Amp/dm <sup>2</sup>
Ánodos insolubles	93 %Pb, 7 %Sn

Tabla 21. Composición y operativa del baño de cromo brillante. Fuente BREF

Mientras que la que utiliza cromo trivalente, fundamentalmente por motivos medioambientales, es:

PRODUCTO	CONCENTRACIÓN
cromo trivalente /sulfato o cloruro	20 g/l
temperatura	25-30 °C
densidad de corriente	7,5-20 Amp/dm <sup>2</sup>
pH	2,5-3,5
Ánodos insolubles	grafito

Tabla 22 Composición y operativa del baño de cromo trivalente. Fuente BREF

Con la formulación que utiliza cromo trivalente no se alcanzan los niveles de dureza y resistencia a la corrosión obtenidos con la formulación de cromo hexavalente. El color obtenido tampoco es igual, siendo más apagado y no tan azulado, por lo que frecuentemente no se acepta en sus aplicaciones decorativas pese a sus claras ventajas medioambientales y de seguridad e higiene.

- Cromo duro

Los baños de cromo duro se usan para piezas que se verán sometidas a grandes esfuerzos mecánicos (amortiguadores, cilindros, etc), utilizándose en su formulación sales de cromo hexavalente.

PRODUCTO	CONCENTRACIÓN
ácido crómico	180-350 g/l
<b>UNO DE LOS SIGUIENTES CATALIZADORES</b>	
iones sulfato	1,8-6 g/l
iones sulfato – iones fluoruro	< 2 % del contenido de ácido crómico
catalizador libre de fluoruros	< 2 % del contenido de ácido crómico

Tabla 23. Composición del baño de cromo duro. Fuente BREF

### 2.3.2.1.6. Estañado

Los recubrimientos de estaño añaden a la resistencia a la corrosión las propiedades de ductilidad y facilidad de recubrimiento. Es por ello que se utiliza frecuentemente para aquellas piezas que presentan formas complejas.

La aplicación más frecuente que se encuentra para los procesos de estañado está en la fabricación de envases que tienen que estar en contacto con alimentos, aerosoles y bebidas. También se utiliza ampliamente en la fabricación de circuitos impresos, así como componentes electrónicos, aparatos eléctricos, utensilios de cocina, etc.

Se utilizan distintas formulaciones, como las siguientes:

PRODUCTO	CONCENTRACIÓN
Sulfato de estaño (ácido)	20-40 g/l
Fluoborato de estaño (ácido)	35-65 g/l
Estannato de sodio o potasio	15-56 g/l

Tabla 24. Composición del baño de estaño. Fuente BREF

PRODUCTO	CONCENTRACIÓN
Sulfato de estaño	20-40 g/l
Ácido sulfúrico	100-150 g/l
Aditivos antioxidantes	Variable

Tabla 25. Composición del baño simple de estaño. Fuente BREF

Las formulaciones libres de fluoroborato, sustituyen este por el ácido orgánico metanosulfónico, el cual presenta mejor estabilidad, reduce la concentración de lodos, incrementa la velocidad de deposición y mejora las propiedades estructurales de los recubrimientos.

### 2.3.2.1.7. Metales preciosos

El recubrimiento de piezas con metales preciosos se utiliza para aplicaciones de joyería, bisutería, decoración, electrónica, etc. El material base sobre el cual se utilizan normalmente estos recubrimientos son:

- latón (aleación cobre (80%)-cinc (20%).
- peltre (aleación estaño 90-100%).
- acero inoxidable.

La obtención de los recubrimientos de metales preciosos, sobre los materiales apuntados, sigue un esquema bastante común:

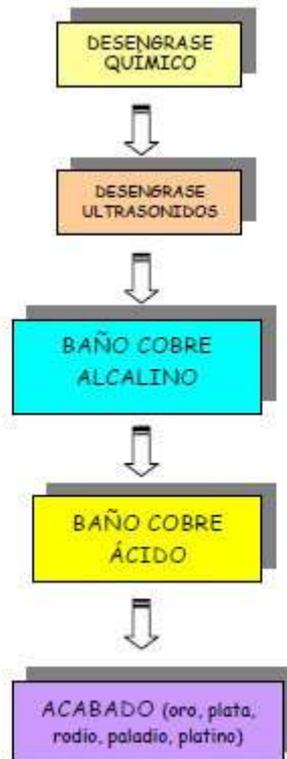


Figura 5. Esquema recubrimiento metales preciosos. Fuente: BREF

- Plata

Es un recubrimiento muy utilizado para acabados de cubertería (bandejas, etc.). También, como se ha comentado, para joyería, bisutería y otras aplicaciones decorativas. Cada vez se utiliza más, como alternativa al oro, los recubrimientos de plata - paladio.

El baño se formula según la siguiente composición:

PRODUCTO	CONCENTRACIÓN
plata (cianuro doble de plata y potasio)	30-65 g/l
cianuro potásico	100-160 g/l
carbonato de potasio	15-20 g/l
temperatura	28-30 °C
densidad de corriente	1 Amp/dm <sup>2</sup>

Tabla 26. Composición y operativa del baño de plata. Fuente BREF

Con objeto de asegurar una adecuada adherencia de la capa de plata se suele dar un flash previo del mismo metal.

- Oro

Además de las aplicaciones mencionadas de joyería y bistuería también se utilizan los recubrimientos de oro en la fabricación de circuitos impresos y conectores.

El baño se formula según la siguiente composición:

PRODUCTO	CONCENTRACIÓN
cianuro doble de oro y potasio	0,5-2 g/l
fosfato disódico	10-20 g/l
abrillantantes	1-5 g/l
temperatura	50-70 °C
densidad de corriente	1 Amp/dm <sup>2</sup>
pH	11-12
ánodos	Titanio platinizado

Tabla 27. Composición y operativa del baño de oro. Fuente BREF.

Frecuentemente se adicionan agentes tamponantes para mantener el pH, y también pequeñas cantidad de metales tales como el níquel, cobalto, indio e incluso hierro, para incrementar la propiedades de protección contra la corrosión y el brillo final, así como el tono del color del acabado.

De igual forma que para el recubrimiento de plata, y con el fin de asegurar una adecuada adherencia de la capa de oro se suele dar un flash previo del mismo metal.

- Paladio

El baño se formula según la siguiente composición:

PRODUCTO	CONCENTRACIÓN
dicloro tetraamina de paladio	4-20 g/l
sales amónicas	---
temperatura	30-55 °C
densidad de corriente	0,5-5 Amp/dm <sup>2</sup>
pH	7,5-8,5

Tabla 28. Composición y operativa del baño de paladio. Fuente BREF

- Rodio

El Rodio es un recubrimiento que aplicado en capas finísimas sobre la plata, le da al recubrimiento un color blanco que evita el problema típico de la plata de la aparición de manchas y puntos negros.

También se utiliza para aplicaciones de carácter técnico como en fabricación de conectores y reflectores, debido a sus elevadas resistencia y dureza.

El baño se formula según la siguiente composición:

:

PRODUCTO	CONCENTRACIÓN
sulfato o fosfato de rodio	2,5-20 g/l
ácido sulfúrico	15-55 g/l
temperatura	40 °C
densidad de corriente	0,5-2 Amp/dm <sup>2</sup>

Tabla 29. Composición y operativa del baño de rodio. Fuente BREF.

A la formulación es frecuente añadir sulfitos y selenio, los cuales previenen la formación de grietas en el recubrimiento.

- Platino

El platino se usa tanto con fines decorativos como para la fabricación de aparatos eléctricos, para equipos de química industrial, etc.



El baño se formula según la siguiente composición:

PRODUCTO	CONCENTRACIÓN
sulfato de dinitroplatino	5 g/l
temperatura	40 °C
densidad de corriente	0,1-1 Amp/dm <sup>2</sup>
pH	2
ánodos insolubles	Titanio platinizado o platino

Tabla 30. Composición y operativa del baño de platino. Fuente BREF.

### 2.3.2.1.8. Metalizado de plástico

En torno al 85 % de los procesos de metalizado de plásticos se aplican sobre el ABS (Acrilonitrilo – butadieno – estireno).

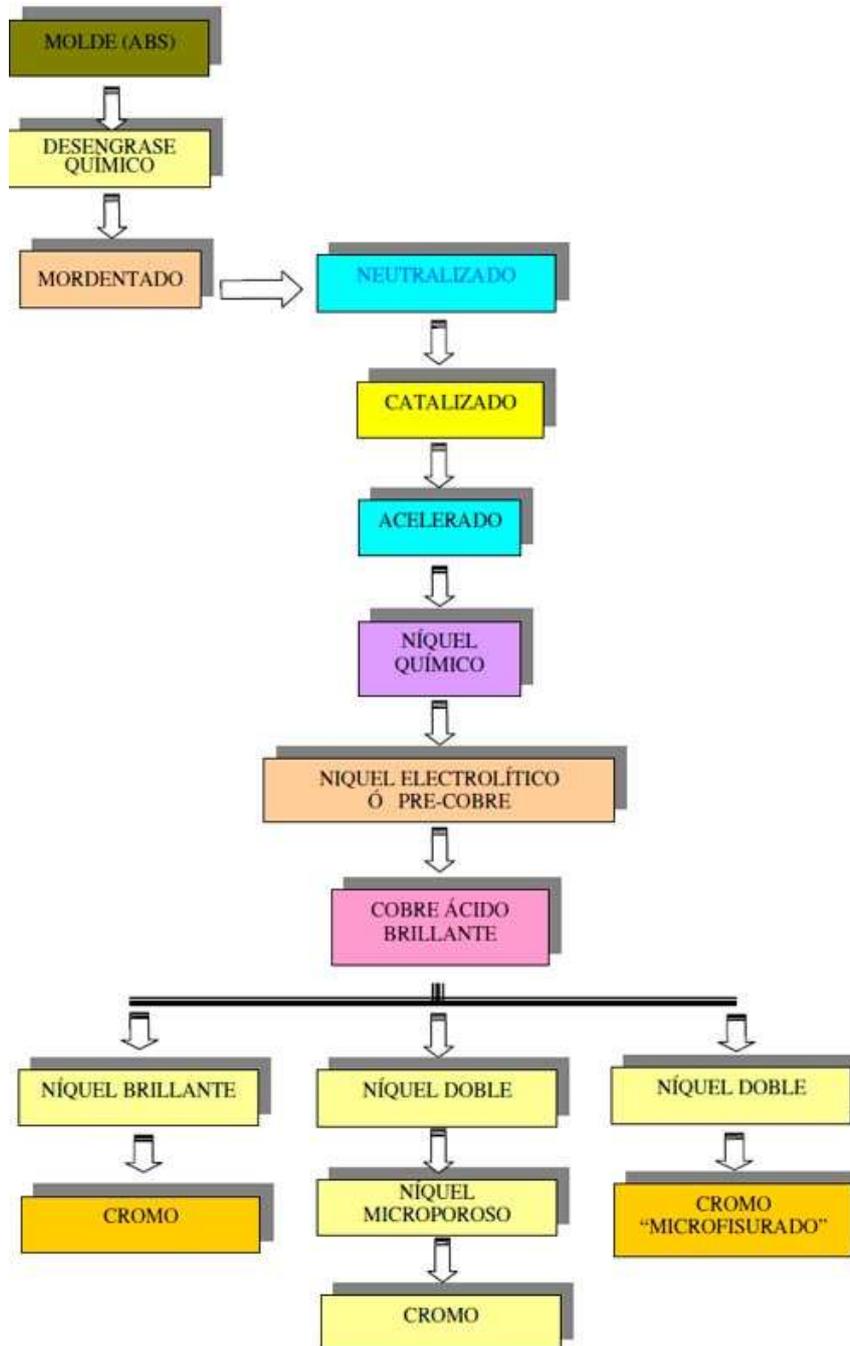


Figura 6. Esquema metalizado de plástico. Fuente: BREF



Los procesos que componen el esquema general del metalizado de plásticos se muestran a continuación:

- Desengrase químico

Para eliminar la suciedad de la superficie se utilizan soluciones alcalinas:

PRODUCTO	CONCENTRACIÓN
sosa cáustica	40 g/l
carbonato sódico	25 g/l

Tabla 31. Composición baño lavado (metalizado de plástico). Fuente BREF

- Mordentado

El primer paso para permitir que la superficie del plástico sea conductora es la creación de microporos en la misma donde posteriormente se introducirán micropartículas que inicien los procesos de deposición, como se verá. Para crear dichos microporos, en el proceso llamado de mordentado, se utilizan oxidantes muy potentes en caliente, como al ácido crómico en medio sulfúrico.

PRODUCTO	CONCENTRACIÓN
ácido crómico	400 g/l
ácido sulfúrico	400 g/l
temperatura	60-70 °C (5 -10 min)

Tabla 32. Composición baño mordentado (metalizado de plástico). Fuente BREF.

- Neutralizado

Se utiliza con el fin de eliminar los arrastres de cromo hexavalente que llevan las piezas al salir del mordentado.

PRODUCTO	CONCENTRACIÓN
agente reductor de cromo hexavalente	2-4 g/l
temperatura	25-35 °C (1-3 min)

Tabla 33. Composición baño neutralizado (metalizado de plástico)

- Catalizador

En esta etapa, núcleos de paladio en estado coloidal se introducen en los microporos creados en el proceso de mordentado. El baño se formula como sigue:



PRODUCTO	CONCENTRACIÓN
ácidos fuertes: ácido clorhídrico 37 %	20-25 % vol
sales de estaño	4-8 g/l
sales de paladio	0,05-0,16 g/l
temperatura	25-30 °C (3-6 min)

Tabla 34. Composición baño catalizador (metalizado de plástico). Fuente BREF

- Acelerado

En esta etapa se trata de eliminar los resto de estaño presentes en la superficie, para lo cual se usan soluciones como la siguiente:

PRODUCTO	CONCENTRACIÓN
Ácidos orgánicos	50-60 g/l
Temperatura	54-60 °C (2-3 min)

Tabla 35. Composición baño acelerador (metalizado de plástico). Fuente BREF.

- Níquel químico

Sobre los núcleos de paladio ocluidos en los microporos se deposita autocatalíticamente una capa de níquel de espesor suficiente como para que la superficie sea conductora de la electricidad. La composición del baño de níquel químico es:

PRODUCTO	CONCENTRACIÓN
Sulfato/ cloruro de níquel	15-30 g/l
Hipofosfito sódico	35-70 g/l
Ácidos orgánicos y estabilizantes	5-10 g/l
Temperatura	24-38 °C (7-10 min)

Tabla 36. Composición baño de níquel químico (metalizado de plástico). Fuente BREF.

A continuación la pieza ya conductora, puede introducirse en un baño electrolítico que normalmente es el de cobre ácido, muy conductor. Sobre el cobre se deposita níquel para acabar con el recubrimiento de cromo.



### 2.3.2.1.8. Anodizado de aluminio

El anodizado de aluminio es un proceso de conversión de superficies, por vía electroquímica, mediante el cual se produce la oxidación de la superficie del metal, formándose en su superficie óxido de aluminio (alúmina ( $Al_2O_3$ )).

Se diferencia de los procesos electrolíticos que se han descrito por el momento en que la superficie es anódica, no catódica, y por tanto en ella se produce un proceso de electro-oxidación.

El tipo de baño de anodizado más utilizado es el que se formula con ácido sulfúrico, utilizándose de forma más limitada las formulaciones en base ácido crómico.

Las capas de óxido de aluminio obtenidas en el proceso pueden someterse posteriormente a un proceso de coloración, utilizando para ello colorantes orgánicos o sales inorgánicas metálicas. La etapa final es un proceso de sellado por el que se incrementa la protección contra la corrosión y se asegura el color dado previamente.

- Anodizado de aluminio con ácido sulfúrico

La composición del baño de anodizado es la siguiente:

concentración ácido sulfúrico	< 200 g/l $\pm$ 10 g/l
aluminio	5-15 g/l
cloruros	< 100g/l

Tabla 37 Composición baño de anodizado de aluminio con ácido sulfúrico. Fuente BREF

- Anodizado de aluminio con ácido crómico

Cuando se utiliza ácido crómico la composición del baño es:

concentración electrolito	30-100 g/l
---------------------------	------------

Tabla 38. Composición baño de anodizado de aluminio con ácido crómico.

- Coloración del anodizado del aluminio

Existen dos sistemas distintos para la coloración del aluminio:



- *Coloración por inmersión*: la más utilizada con una ampliada gama de colores.

PRODUCTO	CONCENTRACION
colorantes	0,05-30 g/l en función del color deseado

Tabla 37. Coloración por inmersión. Fuente BREF

- *Coloración electrolítica*: tiene lugar mediante la inmersión en una disolución ácida en presencia de sales metálicas a la que se le aplica una corriente alterna. Los metales penetran hasta 5  $\mu\text{m}$  en el interior de la estructura porosa del óxido de aluminio. En función del metal utilizado se obtiene un color u otro. La sal más frecuentemente utilizado es el sulfato de estaño, usándose de igual forma sales de níquel y de cobre, y permanganato potásico.
- 
- Sellado

La estructura del óxido de aluminio formado en el proceso de anodizado es poroso. Para cerrar los poros de dicha estructura, en orden a asegurar la resistencia a la oxidación de la superficie, se finaliza el proceso con una etapa de sellado mediante el cual se produce la transformación química de los óxidos por acción de la temperatura o por reacción con ciertas sustancias químicas.

La práctica más común es sumergir el aluminio en agua desmineralizada calentada por encima de los 96 °C. En estas condiciones, el óxido de aluminio se hidrata aumentando su volumen y produciendo el cierre de los poros. Las piezas sumergen durante un periodo de entre 3-4 minutos por micra de grosor. Se mantiene el pH de la solución entre 6 y 6,5, asegurándose la constancia del mismo mediante reguladores de pH.

### 2.3.2.1.8. Lacado electrolítico

Cuando se requiere proteger y realzar los recubrimientos decorativos se les puede aplicar un lacado electrolítico.

Los baños de lacado electrolítico presentan una base acuosa, siendo su aplicación más frecuente cuando se debe proteger recubrimientos de alto valor como el oro, plata y latón. También se utilizan en ocasiones en su forma coloreada para sustituir recubrimientos electrolíticos de elevado coste o difíciles de manejar, como el oro y el bronce. Son muy sensibles a las impurezas y contaminaciones por lo que tienen unas

elevadas exigencias de mantenimiento, las cuales incluyen la instalación de sistemas de ultrafiltración para separar en continuo impurezas metálicas, agua en exceso y ácido orgánicos indeseables.

PRODUCTO	CONCENTRACIÓN
Polímeroacrílico, acrílico-uretano	10-15 %
Disolventes orgánicos	5-15 %

Tabla 39. Composición del lacado electrolítico. Fuente BREF.

### 2.3.2.2. Tratamientos químicos

Son tratamientos en los que se producen en superficie reacciones químicas tendentes a la deposición de un metal por reducción química, o la conversión química de la superficie por reacción con las sustancias químicas de una solución acuosa.

#### 2.3.2.2.1. Níquel químico

- Níquel químico sobre metales

Se utiliza en la fabricación de soportes de almacenamiento de datos, componentes para la industria química y petroquímica etc., para grandes exigencias en uniformidad, dureza, resistencia al desgaste y a la corrosión.

Utilizado en la fabricación de chasis de sistemas para almacenamiento de datos, piezas y componentes de la industria química y petroquímica, cuando se exige una gran uniformidad en el espesor del recubrimiento, elevados valores de dureza, y altas prestaciones de resistencia a la abrasión y la corrosión.

Las soluciones se componen de:

PRODUCTO	CONCENTRACIÓN
sulfato y cloruro de níquel	20-30 g/l
agente reductor (hipofosfito de sodio)	20-40 g/l
agentes quelantes (ácidos orgánicos carboxílicos)	10-50 g/l
abrillantantes	1-5 mg/l

Tabla 40. Composición del baño de níquel químico sobre metales. Fuente BREF

- Níquel autocatalítico en plásticos

Como se ha comentado, la capa que dota a la superficie de los plásticos a metalizar de la necesaria conductividad es la producida por un proceso de reducción

autocatalítica de níquel sobre núcleos de paladio previamente depositados en los microporos del plástico.

Las soluciones se componen de:

PRODUCTO	CONCENTRACIÓN
sulfato o cloruro de níquel	15-30 g/l
agente reductor (hipofosfito de sodio)	35-70 g/l
ácidos orgánicos y estabilizantes	5-10 g/l

Tabla 41. Composición del baño de níquel autocatalítico para plásticos. Fuente BREF.

#### 2.3.2.2.2. Fosfatado

En los procesos de fosfatado se produce la formación de sucesivas capas de fosfatos metálicos, de estructura amorfa o cristalina, sobre la superficie del metal. Su función es:

- Dotar al material de una elevada resistencia a la corrosión
- Proveer a la superficie del material de una buena base de anclaje para recubrimientos posteriores como pintura o lacada.

Los procesos de fosfatado se aplican a materiales como el hierro, el cinc y el aluminio. En la práctica se aplica mediante aspersion o por inmersión, en función de la cantidad, forma y tamaño de las piezas a tratar.

En orden a aumentar aún más la resistencia a la corrosión de las capas de fosfatado se añade normalmente un proceso posterior de pasivado químico con sales de cromo hexavalente.

En lo que sigue se describen los procesos de fosfatado más frecuentes:

- Fosfatado amorfo

Se produce la deposición sobre la superficie del metal de un recubrimiento de estructura amorfa compuesto principalmente por fosfato de hierro. Proporciona la deseada protección contra la corrosión y el anclaje de las capas posteriores.

Las capas de fosfatos se forman mediante la acción de una solución de ácido fosfórico a la cual se adicionan acelerantes de naturaleza inorgánica u orgánica.

Se elige este fosfatado cuando se requiere una protección contra la corrosión a un coste ajustado, por ejemplo en la fabricación de muebles metálicos.

- Fosfatado cristalino

En el fosfatado cristalino, como su nombre indica el recubrimiento de fosfato presenta una estructura cristalina compuesta principalmente por fosfato de cinc, el cual es el que asegura la protección contra la corrosión del material base y el anclaje de los posteriores recubrimientos. Se formula principalmente con ácido fosfórico y fosfato de cinc a los que se adicionan oxidantes que permitan acelerar el proceso.

### 2.3.2.2.3. Pasivado

El pasivado es un tratamiento de conversión química que se aplica para elevar la resistencia a la corrosión de los metales o los recubrimientos sobre estos. Los procesos de pasivado más utilizados son los de base crómica, ya sea los que se formulan con sales de cromo hexavalente o con sales de cromo trivalente,.

Se aplica de forma extensa para las piezas recubiertas con capas de cinc, ya que aunque el material base se encuentra debidamente protegido por la barrera de cinc, este metal es muy poco noble por lo que se oxida bastante rápidamente. También se aplica el pasivado en piezas niqueladas o latonadas a bombo, dado que a bombo se obtienen bajos espesores de recubrimientos además de porosos, y por consiguiente poco resistentes a la corrosión.

Las composiciones de los diferentes pasivados son las siguientes:

- Pasivado azul

PRODUCTO	CONCENTRACIÓN
cromo trivalente	0,5-2 g/L
cloruros	2-7 g/L

Tabla 42. Composición del baño de pasivado azul

- Pasivado verde

PRODUCTO	CONCENTRACIÓN
cromo hexavalente	20-25 g/L
fosfatos	30-35 g/L

Tabla 43. Composición del baño de pasivado verde

- Pasivado amarillo

PRODUCTO	CONCENTRACIÓN
cromo hexavalente	3-5 g/L
sodio cloruro	0,5-2 g/L

Tabla 44. Composición del baño de pasivado amarillo

- Pasivado negro

PRODUCTO	CONCENTRACIÓN
Cromo hexavalente	10-15 g/L
nitrato de plata	1-2 g/L
ácido acético	10 g/L

Tabla 45. Composición del baño de pasivado negro

#### 2.3.2.2.4. Sellado

Recientemente se están aplicando a los pasivados cromicos tratamientos posteriores de sellado mediante la acción de silicatos y otras sustancias orgánicas que actúan en base acuosa. De esta forma se mejoran las propiedades anticorrosivas de los pasivados, sobre todo cuando estos se producen con soluciones formuladas sin cromo hexavalente.

PRODUCTO	CONCENTRACIÓN
silicatos	20-40 g/L
otras sustancias orgánicas	10-20g/L resinas acrílicas modificadas

Tabla 46. Composición del baño de sellado. Fuente BREF.

Algunas formulaciones contienen también níquel:

PRODUCTO	CONCENTRACIÓN
fluoruro de níquel	20-30 g/L

Tabla 47. Otros baños de sellado. Fuente BREF.

#### 2.3.2.3. Lavado

Las operaciones de lavado que se aplican en los procesos de galvanotecnia tienen por objeto evitar la contaminación por arrastre entre los distintos baños del proceso y frenar al mismo tiempo las reacciones químicas que ocasionan los electrolíticos en la superficie a tratar. Los caudales de agua que se utilizan en las operaciones de lavado se convertirán, una vez realizada su función, en vertidos de aguas residuales, por lo que el volumen de estos caudales determinará el tipo y tamaño de los sistemas de tratamiento de depuración necesarios. Los caudales de agua aplicados frecuentemente son superiores a los que en realidad son estrictamente necesaria por una a menudo falsa percepción de que a mayor cantidad de agua mejor calidad de enjuague. La calidad del enjuague no depende exclusivamente del caudal sino también de la estructura de los sistemas de lavado, por lo que se trata de establecer un compromiso entre la calidad del lavado exigible y la necesidad de utilizar la mínima cantidad de agua posible, para ahorrar esta y para reducir al máximo el tamaño de las instalaciones de tratamiento de aguas residuales.

La variable principal que determina las necesidades de agua en un lavado es el arrastre. El arrastre a su vez depende de la forma de las piezas, la rugosidad de la superficie, la viscosidad, temperatura y densidad de los baños electrolíticos etc. La siguiente variable es, como se ha comentado, la estructura y disposición de los enjuagues, como se verá más adelante.

#### **2.3.2.4. Secado**

Como última etapa posterior a todos los tratamientos superficiales, las piezas deben someterse a un proceso de secado que sea lo más rápido y eficaz posible, de tal forma que se evite la formación de manchas y la corrosión de las capas metálicas. Los sistemas que más se utilizan son el secado con agua caliente y el secado con aire.

Cuando se utilizan procesos de bombo o tambor es frecuente utilizar adicionalmente al secado con aire la centrifugación, la cual, siempre que las piezas lo permitan, constituye un método altamente efectivo y muy eficiente desde el punto de vista energético.

##### ***2.3.2.4.1. Secado mediante agua caliente.***

Es el método más sencillo y consiste en sumergir las piezas en una posición con agua caliente durante unos segundos. Después de secar las piezas estas se secan al aire.

Se usa en instalaciones de poca capacidad de manipulación totalmente manual.

Es necesario controlar cuidadosamente la temperatura del agua cuando se utiliza este sistema en el secado de plásticos, ya que a temperaturas superiores a 60 °C, las piezas podrían deformarse. La misma precaución hay que tener cuando se secan piezas cincadas y piezas pasivadas, ya que en estos casos se trata de prevenir la deshidratación del recubrimiento y la pérdida de la protección contra la corrosión de las capas de pasivado. Sin embargo, cuando se secan piezas cromadas es posible secar con temperaturas hasta de 90 °C.

Para evitar manchas de sales en la superficie de las piezas es preceptivo utilizar agua desionizada.

Este sistema es muy deficiente desde el punto de vista energético ya que se producen grandes pérdidas de calor, siendo su principal inconveniente

##### ***2.3.2.4.2. Secado mediante aire caliente***

En instalaciones automáticas o manuales en las que las piezas se trasiegan a bastidor el secado que se utiliza normalmente es el que se aplica con aire caliente. En una

cuba provista de cierre, que suele tener idénticas dimensiones que las del resto de tratamientos, situada al final de la línea, se introducen los bastidores y se les aplica una corriente de aire caliente. La corriente de aire caliente se recircula de la parte alta a la parte baja de la cuba manteniéndola a una temperatura entre los 60 y 80 °C. El sistema también presenta cierta ineficiencia energética, debido a las fugas de aire caliente que se producen en la parte superior de la cuba, pero menos que el secado con agua caliente.

La calefacción del aire se produce, en instalaciones grandes, instalando intercambiadores de calor de vapor o de aceite térmico. Es posible, para instalaciones de menor tamaño, calentar directamente el aire por medio de quemadores de gas.

### 2.3.2.5. Desmetalizado

Las operaciones de desmetalizado se aplican para eliminar el recubrimiento de aquellas piezas tratadas de forma defectuosa y así poder introducir las nuevamente en el proceso. También se utilizan para eliminar las capas de metal depositadas sobre los contactos de los bastidores y bombos. En todo caso, la operación de desmetalizado debe eliminar los recubrimientos sin afectar al metal base. Podemos encontrar desmetalizados electrolíticos de naturaleza anódica o químicos. Los electrolíticos tienen composiciones parecidas a las de un electrolito, mientras que los químicos contienen cianuros y complejantes orgánicos potentes los cuales generan frecuentemente serios problemas en los procesos de tratamiento de las aguas residuales

El desmetalizado de los bastidores puede realizarse también por medios mecánicos.

#### 2.3.2.5.1. Desniquelado

- Por vía química

PRODUCTO	CONCENTRACIÓN
ácido nítrico	600-850 g/l

Tabla 48. Desniquelado químico. Fuente BREF

- Por vía electrolítica

PRODUCTO	CONCENTRACIÓN
nitrito, bromuro, cianuro, acetato	20-100 g/l

Tabla 49. Desniquelado electrolítico. Fuente BREF.

### 2.3.2.5.2. Descromado

El descromado se realiza casi exclusivamente en un proceso electrolítico.

PRODUCTO	CONCENTRACIÓN
Hidróxido sódico	50-100 g/l
Complejantes	2-10 g/l

Tabla 50. Composición de baño de descromado. Fuente BREF.

## 2.4. Criterios de selección y estructuración de las técnicas más relevantes

La Directiva 96/61/CE del Consejo, de prevención y control integrados de la contaminación (IPPC) dotó a los sectores industriales implicados y a las Autoridades Competentes de instrumentos integradores cuyos ejes más importantes han venido a ser La Autorización Ambiental Integrada (AAI) y el concepto de Mejor Técnica Disponible. La aplicación de la Directiva implicó la estrecha colaboración de los Sectores Industriales con las Autoridades Europeas para la elaboración de los documentos de Mejores Técnicas Disponibles, tanto europeos – documentos BREF – como las Guías de Mejores Técnicas Disponibles en España de diversos sectores industriales.

Es destacable la labor del Sector de Tratamiento de Superficies en la elaboración de la Guía de Mejores Técnicas Disponible en España del Sector de Tratamiento de Superficies Metálicas y Plásticas y el interés mostrado en la innovación tecnológica y la mejora de procesos, con objeto de incluir las metodologías recogidas en dicha guía en su estrategia empresarial como criterios de competitividad.

Es por ello que dicho documento es una referencia obligada siempre que se quiere abordar una estrategia encaminada a mejorar la eficiencia de una industria con criterios de efectividad, eficiencia y sostenibilidad. De tal fuente se han seleccionado las técnicas más relevantes a aplicar en los procesos de recubrimiento en orden a conseguir mejoras en la eficiencia productiva.

En lo que sigue se presentará un conjunto de técnicas que como es natural no tienen por qué ser apropiadas para cualquier tipo de instalación, pero sí que servirán de guía para delinear un plan de medidas de optimización y mejora. El conjunto de variables que repercuten sobre las características físico químicas de los procesos y las operaciones de lavado es muy amplio: composición de los baños, concentración y temperatura de los mismos, tipo, material y forma de las piezas a procesar, cantidad de piezas a tratar, exigencias de calidad de los recubrimientos, volumen y características del agua disponible, requisitos de calidad de los enjuagues, disponibilidades de espacio, etc. Debe realizarse un estudio pormenorizado de las



medidas técnicas disponibles a la luz de tales variables, teniendo en cuenta su viabilidad tanto desde el punto de vista técnico como económico.

El impacto económico de las medidas que se proponen es variable, siendo en algunos casos muy pequeño e incluso despreciable, pero en otros caso pueden suponer unas necesidades inversión elevados, por lo que, como se ha dicho, se impone la necesidad de realizar estudios de viabilidad económica previos a la implantación de las medidas, sin descartar otras consideraciones que puedan limitar la elección de una u otra medida.

## 2.4.1. Gestión de entradas

### 2.4.1.1. Electricidad

En orden a reducir el consumo eléctrico se considerarán las siguientes alternativas:

- Reducir las pérdidas de energía reactiva, para lo cual se deberá realizar un control anual, procurando que el  $\cos \varphi$  de la fracción entre el voltaje y los picos de corriente se mantenga de forma continuada por encima de 0,95.
- Minimizar la caída de tensión entre conectores y conductores, para lo cual se deberá reducir al máximo la distancia entre ánodos y rectificador; para ellos se dispondrá de pletinas cortas manteniendo las mismas a temperaturas frías mediante sistemas de enfriamiento por agua cuando los sistemas por aire no sean suficientes.
- Los rectificadores instalados deberán tener el menor factor de conversión en la medida de lo posible.
- Sustituir equipos eléctricos como motores y bombas ineficientes energéticamente por equipos más modernos más eficientes.
- Se deberá procurar que los baños trabajen en sus condiciones óptimas, para lo cual se deberán mantener las concentraciones de los constituyentes y los parámetros de funcionamiento en sus valores correctos, dado que cualquier desviación repercutirá en una disminución del rendimiento eléctrico del proceso.

### 2.4.1.2 Calentamiento de soluciones de proceso o enjuagues

Los sistemas más frecuentes que se utilizan para el calentamiento de las soluciones de proceso o los enjuagues podemos encontrar

- Serpentes de agua caliente recirculada a presión
- Serpentes de agua sin presión
- Circuitos alimentados con fluidos térmicos



- Calefacción directa del baño, para lo cual se utilizan resistencias eléctricas sumergidas directamente en el baño e incluso quemadores de gas o gas oil. En el caso de que se utilice este sistema en cubas construidas con materiales inflamables es necesario implantar sistemas de control de nivel del líquido.

Se deberá monitorizar en todo caso la temperatura de las soluciones manteniéndola en el intervalo óptimo del proceso.

#### 2.4.1.3 Reducción de las pérdidas de calor en soluciones de proceso

Es posible reducir las pérdidas de calor que se pueden producir en las soluciones de proceso aplicando, allá donde sea técnicamente posible, las siguientes medidas:

- Implantar un sistema de aislamiento térmico de aquellas cubas de procesos trabajando en caliente o refrigerados.
- Considerar la recuperación del calor de unos procesos para calentar otros.

Es posible que existan técnicas encaminadas a las pérdidas de calor que produzcan una disminución en la evaporación de los baños. Este efecto colateral puede hacer ineficaz la utilización de enjuagues estancos de recuperación usados para la devolución de los arrastres al baño de origen de los mismos. Como la principal causa de la contaminación son los arrastres habrá que estudiar cuidadosamente las medidas a implantar y su impacto sobre la contaminación, dando como prioritarias, si es posible, las medidas encaminadas a la reducción y recuperación de los arrastres. Por consiguiente es necesario establecer un equilibrio entre la minimización de las pérdidas de calor en los baños y la existencia de cierto grado de evaporación en el baño que permita hacer uso de las técnicas de recuperación de arrastres.

#### 2.4.1.4 Enfriamiento de soluciones de proceso

Los sistemas de refrigeración de las soluciones de proceso deberán ser de circuito cerrado, en orden a minimizar los consumos de agua.

Cuando por algún motivo no sea posible utilizar sistemas cerrados se procurará que el agua utilizada se reutilice en otras aplicaciones de la empresa, como por ejemplo para alimentar posiciones de enjuague de las líneas galvánicas.

### 2.4.2. Consumo de agua

#### 2.4.2.1 Acondicionamiento del agua previo a su utilización

Las aguas que se utilicen para alimentar las soluciones de proceso y los enjuagues



deberán ser analizadas para determinar su composición química. Se deberá tener especial cuidado en determinar los valores de hierro, calcio, magnesio, manganeso y cloruros, componentes que pueden influir de forma negativa en los procesos de electrodeposición.

A continuación se enumerarán directrices generales respecto a la calidad química que se debe exigir al agua utilizada en ciertos procesos:

- Para procesos alcalinos y sus subsiguientes enjuagues es recomendable utilizar agua blanda ya que las aguas duras pueden producir precipitados indeseables y manchas sobre los recubrimientos.
- Para procesos que trabajan en caliente es preferible utilizar agua desmineralizada, o como mínimo descalcificada para de ese modo evitar un aumento gradual en la concentración de sales.
- Para la alimentación de las etapas de lavado finales se debe utilizar agua de alta calidad para evitar que la presencia de sales produzca la formación de manchas en el secado y la corrosión posterior del recubrimiento debido a restos de cloruros en superficie.

Para acondicionar el agua de alimentación a los procesos se pueden utilizar las siguientes técnicas:

- Filtración en arena o arena/antracita
- Filtración en carbón activo
- Descalcificación por intercambio iónico
- Producción agua desmineralizada por intercambio iónico (hasta unos 0-2  $\mu\text{S}/\text{cm}$ )
- Ósmosis inversa (hasta unos 150-400  $\mu\text{S}/\text{cm}$ )

#### **2.4.2.2 Medidas generales de minimización del consumo de agua**

Como primera medida general es importante llevar un control de todos los puntos de consumo de agua registrando los datos de consumo de forma regular.

El consumo debe referirse a alguna unidad que permita su comparación y referencia, como por ejemplo, la superficie ( $\text{dm}^2$ ,  $\text{m}^2$ ) o peso de piezas (kg, tm).

Entre las medidas disponibles para que el consumo de agua se mantenga en unos valores óptimos podemos citar las siguientes:



- Instalar caudalímetros en los puntos de alimentación de agua junto con válvulas de regulación de caudal que permitan fijar el caudal óptimo para la calidad de enjuague requerida.
- Medir la conductividad o pH del agua de enjuague estableciendo consignas en estos parámetros que abran o cierren, mediante electroválvulas, la entrada de agua limpia.
- Implantar, en líneas automáticas, electroválvulas comandadas por temporizadores.

#### 2.4.2.3. Mejora de la calidad de enjuague

La calidad de enjuague puede verse mejorada aplicando las siguientes medidas:

- controlar el tiempo de contacto entre la superficie a lavar y el agua de la cuba; la eficacia del enjuague incrementa con un tiempo de contacto suficiente entre agua y superficie a lavar
- la entrada del agua y la salida de la misma en las cubas de enjuague debe tener lugar de forma que se asegure la máxima renovación del agua contenida en las mismas
- la agitación por aire del agua de la cuba de enjuague mejora la renovación del agua y la calidad del lavado. Cuando no es conveniente utilizar aire para evitar posibles oxidaciones de los recubrimientos se pueden utilizar eductores que pueden cumplir la misma función.

#### 2.4.2.4 Reutilización de determinadas aguas

La reutilización de las aguas de salida de determinadas funciones de enjuague para la alimentación de otras funciones de enjuague u otros usos fuera de las líneas galvánicas también permiten reducir el volumen del agua consumida.

Esta medida puede aplicarse, por ejemplo, de las siguientes formas:

- la salida de los enjuagues de decapados ácidos pueden usarse para alimentar alguna etapa de lavado previa, como un desengrase alcalino anterior.
- la salida de los enjuagues de baños de proceso pueden usarse para alimentar los enjuagues de procesos de activado o neutralizado previos.
- como se ha comentado es posible reutilizar las aguas de los circuitos abiertos de refrigeración para alimentar ciertos enjuagues
- si se dispone de sistemas de ósmosis inversa para acondicionamiento de aguas es posible reutilizar los rechazos para alimentar enjuagues no muy exigentes, como los correspondientes a las etapas de desengrase.



### 2.4.3. Reducción del arrastre

En general, el arrastre de solución de baño de proceso conlleva:

- la pérdida de materias primas.
- la necesidad de lavado.
- un mayor riesgo de contaminaciones cruzadas entre procesos.
- una necesidad de depuración de aguas y, consecuentemente.
- un consumo de reactivos de depuración.
- un consumo de energía
- una importante generación de lodos (en muchos casos, peligrosos)
- el mantenimiento de las instalaciones implicadas.

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 su temperatura.

#### 2.4.3.1 Reducción de la viscosidad de los baños

Reducir la viscosidad de las soluciones de proceso es una de las técnicas principales encaminadas a reducir los arrastres. Esta reducción puede llevarse a cabo:

- eligiendo las concentraciones más bajas de los componentes de los baños o utilizando procesos que trabajen a baja concentración, en cuanto los procesos lo permitan.
- rebajando la tensión superficial de las soluciones mediante la adición de aditivos humectantes.
- eligiendo la temperatura más elevada del baño, siempre dentro del rango de temperatura y conductividad especificados por la ficha técnicas del mismo

#### 2.4.3.2 Reducción de arrastre en bastidores

La elección de los bastidores a utilizar para un proceso dado es función de las piezas a tratar. En esta elección deberán tenerse en cuenta criterios que favorezcan el



escurrido de las piezas. Existen en el mercado herramientas informáticas que permiten simular el comportamiento de distintas configuraciones de bastidor en orden a elegir la óptima, tanto desde el punto de vista del arrastre como de la distribución de espesores en las piezas.

En orden a asegurar la máxima reducción de los arrastres en procesos que trabajan a bastidor se tendrán en cuenta las siguientes prácticas:

- las piezas en los bastidores se dispondrán de forma que se evite la retención de líquidos en las piezas; para ellos se colocarán estas en ángulo o verticales, las concavidades deberán estar dirigidas hacia abajo vigilando que no se formen burbujas de aire atrapadas en el interior de las piezas que podrían dificultar los procesos de tratamiento.
- seleccionar aquellos diseños de bastidor que faciliten el fácil escurrido de las piezas y que eviten, en la medida de lo posible, que unas piezas goteen sobre las inferiores.
- introducir en líneas automáticas sistemas de vibración que aplicados sobre el bastidor cuando este se encuentra sobre el baño favorezcan el escurrido sobre el propio baño.
- procurar que la extracción del bastidor del baño se realice lentamente.
- dejar escurrir la pieza sobre el baño un tiempo suficiente, en función de las características del baño. En instalaciones manuales se instalarán barras cuelga bastidores sobre el mismo baño para dejar escurrir el bastidor dicho tiempo suficiente.
- implantar bandejas de escurrido o cubas de transferencia.
- entre las cubas de la línea se implantarán tapajuntas con inclinación hacia el baño.
- en aquellos baños que evaporan, con temperaturas superiores a los 40 °C, se aplicará un sistema de enjuague por spray o por aire sobre el mismo baño para devolver el arrastre al baño original.
- para cada proceso individualizado se deberá determinar su tiempo óptimo de escurrido, siempre considerando las limitaciones inherentes a ciertos baños.

#### 2.4.3.3. Reducción de arrastre en procesos a tambor

Las líneas que trabajan a bombo o tambor, el arrastre es diez veces superior al que se puede encontrar en las líneas de bastidor. En este caso se pueden aplicar las siguientes técnicas:

- procurar que la extracción del bombo del baño se realice lentamente maximizando de esa forma el escurrido sobre el baño.



- cuando el bombo se encuentra sobre el baño se deberán realizar giros de 90 °C de forma intermitente e inversa, en la medida en que el proceso lo permita.
- implantar bandejas de escurrido o cubas de transferencia cuando entre las cubas exista mucho espacio o cuando los bombos tengan que cruzar un pasillo.
- implantar tapajuntas con inclinación hacia el baño entre las cubas de la línea.
- determinar el tiempo óptimo de escurrido para cada proceso individualizado, considerando las características propias del baño, de igual forma como en el caso de las líneas de bastidor.

#### 2.4.4. Técnicas de enjuague

La función de las etapas de enjuague o lavado es evitar que se produzca contaminación cruzada entre los distintos baños, al mismo tiempo que se evita que el electrolito que arrastre la pieza a la salida de un baño dado pueda afectar a la superficie de la pieza por fenómenos de corrosión, pasivación o cristalización.

Un enjuague eficiente será aquel que para alcanzar la calidad de lavado prescrita para el proceso se utilice el mínimo volumen de agua.

En la práctica, es posible reducir el volumen de agua que se utiliza en un enjuague, manteniendo la misma calidad de lavado, de dos formas:

- reduciendo el caudal de arrastre
- modificando la estructura de las etapas de enjuague

El caudal de enjuague a aplicar es función del caudal de arrastre, de la estructura de las etapas de enjuague y de la calidad exigida.

Por ellos se deberá:

- determinar experimentalmente el arrastre que producen las piezas que se tratan con mayor frecuencia
- definir la calidad de enjuague exigible a cada operación de lavado
- calcular el caudal que se debe aplicar a cada función de enjuague en función del arrastre y la calidad de lavado
- cuando ello sea posible se implantarán las estructuras de enjuague que impliquen el mínimo caudal de alimentación, teniendo en cuenta las concentraciones y conductividades resultantes en el vertido de las aguas residuales.

En lo que sigue se describirán las distintas funciones de enjuague que se pueden utilizar y cuándo se usarán unas u otras.

#### 2.4.4.1 Enjuague múltiple en cascada a contracorriente

El sistema consiste en hacer entrar agua limpia por la última posición del enjuague y hacerla pasar en cascada hasta la primera cuba, desde donde el agua se vierte (o, si es factible, se recupera devolviéndola al baño de proceso para compensar las pérdidas por evaporación). El sentido de las piezas es contrario al de la entrada de agua; por ello, el sistema se denomina "en cascada a contracorriente".

Respecto a un enjuague simple, consistente en una sola posición de lavado con agua corriente, es posible alcanzar reducciones del orden del 95 % e incluso más.

Valores de reducción en el consumo de agua, respecto a enjuagues simples, del orden del 95 % o superiores, son fácilmente alcanzables con esta técnica.

El número de posiciones que se suele utilizar es de dos o tres, ya que la implantación de más cubas no produce un incremento significativo en la reducción del caudal y supone una utilización excesiva de espacio.

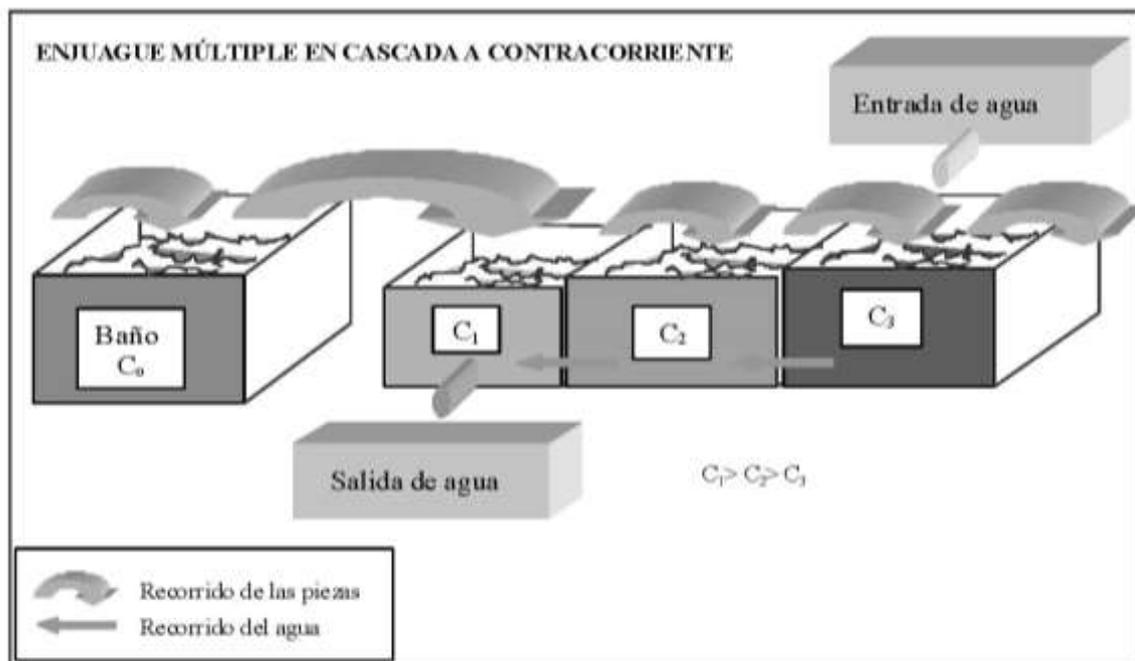


Figura 7. Enjuague múltiple en cascada y contracorriente. Fuente: BREF



#### 2.4.4.2. Enjuague químico

En un enjuague químico las piezas se lavan en una cuba con agua estanca a la que se adiciona un reactivo químico. De esa forma se produce una por un lado un lavado por dilución y un tratamiento químico de alguno de los componentes que arrastra la pieza procedente del baño anterior. Normalmente, después del enjuague químico se realiza un lavado con agua corriente antes de pasar al baño siguiente. Ejemplos de enjuague químico pueden ser:

- lavado de piezas procedente de baños cianurados: se adiciona hipoclorito sódico para realizar una pre-oxidación del cianuro
- lavado de piezas procedentes de baños de cromo hexavalente: se adiciona bisulfato sódico para la reducción del cromo

#### 2.4.4.3. Enjuague estático

El enjuague estático se lleva a cabo en una cuba en la que no se produce la alimentación en continuo de agua. Es posible utilizar una serie de varias cubas estancas para lavados sucesivos. La concentración de las sales en las cubas se incrementa progresivamente por lo que periódicamente se deben renovar el líquido de las cubas, para lo cual se vacía el contenido de la primera posición rellenándola con el líquido de la segunda, la cual a su vez se rellena con el de la tercera y así sucesivamente. Si el baño que precede al enjuague estático trabaja por encima de los 40 °C se puede emplear el líquido del vaciado de la primera cuba para reponer las pérdidas por evaporación.

Para mejorar la eficacia del lavado, dado que no hay renovación del agua, se debe aplicar un sistema de agitación de la misma.

Cuando se trabaja con elevados caudales de arrastre se recomienda combinar un enjuague estático de varias posiciones en con enjuagues corrientes en recirculación

En el caso de caudales de arrastre elevados es recomendable la implantación de un enjuague estático múltiple combinado con enjuague recirculado en circuito cerrado con columnas de intercambio iónico, por ejemplo. Para ellos se utilizarán dos o más enjuagues estancos de recuperación, que se utilizarían para compensar las pérdidas de evaporación, y una tercera posición con agua corriente cuya salida se hará pasar por resinas de intercambio iónico para posteriormente volver a alimentar la posición del enjuague corriente.

#### 2.4.4.4. Enjuague eco

Un enjuague ECO es un enjuague constituido por un enjuague estático en el cual las piezas se sumergen antes de entrar en el baño correspondiente y después de pasar por él. Nunca se vacía ya que la concentración de las sales en el enjuague se estabilizan en el cincuenta por cien de la del baño precedente.

Este tipo de enjuague se suele aplicar en baños en los cuales no es posible devolver el agua del enjuague al baño porque no evapora lo suficiente al trabajar a temperaturas inferiores a 40 ° C.

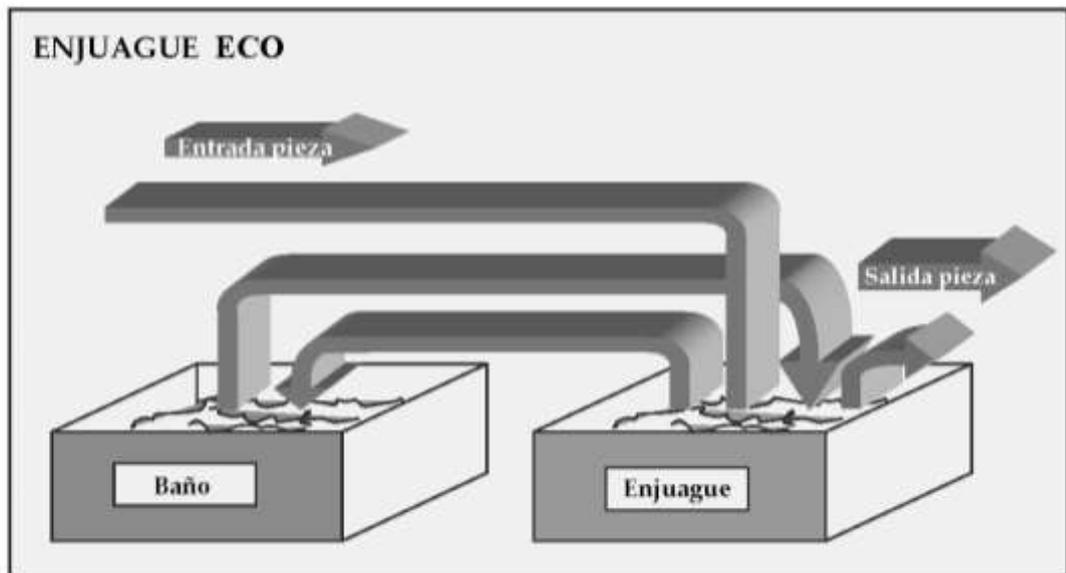


Figura 8. Enjuague ECO. Fuente: BREF

No se debe utilizar a continuación de baños de pretratamiento como desengrasas o decapados; tampoco para procesos químicos como el pasivado, ya que en estos casos, los componentes de los baños en el enjuague, que se encuentran a una concentración del 50 % de la original, actúan sobre la pieza en condiciones anómalas pudiendo deteriorar la superficie de la misma.

#### 2.4.4.5. Enjuague por aspersion

En el enjuague por aspersion lo que se hace es proyectar el agua sobre la pieza en forma de fina niebla aunando al efecto de dilución del arrastre el efecto hidromecánico del agua proyectada sobre la superficie. De esta forma se puede reducirse en un 40-50 %, el consumo de agua, mejora la calidad de lavado y se detiene la acción química de la solución arrastrada sobre la superficie de la pieza, con lo que es posible alargar el tiempo de escurrido.

El spray puede aplicarse encima del baño de proceso, cuando este trabaja a temperatura mayor de 40 °C con pérdida por evaporación, o sobre una cuba posterior de enjuague o vacía para recuperación de arrastres.

#### **2.4.4.6. Enjuague con agua caliente**

Un enjuague con agua caliente se suele utilizar para facilitar el secado posterior de las piezas.

También es frecuente encontrarlo en aquellos casos donde se precisa un enjuague final de alta calidad. Es el caso de los procesos de cromado decorativo de superficies planas en los cuales se precisa de un lavado final con agua desionizada en caliente para obtener una mayor eficacia de lavado y promover un rápido secado de la superficie sin riesgo de aparición de manchas por cristalización de sales.

#### **2.4.4.7. Evaporación para recuperación de arrastres de enjuagues**

La implantación de las técnicas tendentes a recuperar los arrastres puede implicar cambios relativamente simples como muchos de los anteriormente expuestos o por el contrario implicar fuertes inversiones que necesitan de un estudio de viabilidad técnico-económica previo. Una de estas técnicas es la que aplica la evaporación para incrementar la tasa de recuperación de arrastres.

La recuperación de arrastres es una de las aplicaciones más exitosas de los sistemas de evaporación. En esta aplicación se trata de concentrar las aguas de un enjuague estático obteniéndose por un concentrado que puede devolverse al baño original y por otro lado agua destilada que puede reutilizarse en una función de enjuague. Otra forma de promover la recuperación de los arrastres implica la aplicación de la evaporación en el propio baño de proceso para de esta manera incrementar el volumen de arrastre que se puede recuperar desde un enjuague estático de recuperación. Este modo de proceder se aplica, por ejemplo para baños de cromo decorativo donde la evaporación del baño es escasa al mismo tiempo que los arrastres son elevados. De esta forma es posible alcanzar tasas de recuperación del orden del 90 %, pudiéndose alcanzar, cuando se aplica de forma adecuado, niveles cercanos al vertido cero.

Los equipos que trabajan al vacío, con temperaturas de ebullición muy por debajo de los 100 °C, son particularmente eficientes desde el punto de vista energético.



Siempre que se aplique un sistema de recuperación de arrastres al baño original es importante incrementar los controles de este ya que generalmente implican que la presencia de contaminantes incrementa de forma significativa.

Los sistemas de evaporación pueden implantarse de formas distintas:

- con funciones de enjuague múltiples en cascada y contracorriente, en casos en que el baño trabaje a cierta temperatura
- con enjuagues estáticos de recuperación, como se ha descrito
- directamente aplicado en el baño de proceso para forzar la evaporación y facilitar la devolución de los arrastres de los enjuagues estáticos subsiguientes

#### **2.4.4.8. Resinas de intercambio iónico para reciclaje de enjuagues**

El sistema consiste en hacer pasar las aguas por unas columnas con resinas intercambiadoras de cationes, por hidrogeniones (H+), y aniones por hidroxilos (OH-), retornando un agua con una elevada calidad por su bajo contenido en iones. El sistema retorna el agua a la cuba de enjuague puesto que el diseño de la instalación funciona en circuito cerrado.

Los enjuagues recirculados con resinas de intercambio iónico, según la operación a la que se destinen, pueden trabajar durante largo tiempo, a conductividades inferiores a 50  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , en incluso, por debajo de 5  $\mu\text{S}/\text{cm}$  si se trata de enjuagues finales.

No es adecuado su uso en presencia de agentes oxidantes fuertes y elevadas concentraciones de materia orgánica.

Estos sistemas van provistos de una instalación para su regeneración (ácido clorhídrico o sulfúrico para el catión, e hidróxido sódico para el anión). Existe, en algunos casos, la posibilidad de regeneración externa del equipo agotado; en este caso, sólo es posible emplear equipos de reducido tamaño (hasta 50-75 l de resina por columna) para permitir su traslado y manipulación; al tratarse de residuos peligrosos (en el caso que las resinas se colmaten de metales u determinados aniones –cianuros, cromo, etc.-), su gestión externa debe realizarse a través de gestor autorizado.

La regeneración del equipo en la propia empresa genera un eluato con los contaminantes que habían quedado retenidos en la resina, más una elevada conductividad, debido a la presencia de cloruros y sodios procedentes de los regenerantes. Si bien los contaminantes pueden eliminarse por vía físico química, dosificados lentamente en la instalación de depuración de aguas residuales, el concentrado salino tiene peor solución, originándose en el vertido niveles de conductividad altos que, en determinados casos, pueden superar los límites máximos

permisibles.

Para eliminar la posible contaminación orgánica en los sistemas de enjuague y su posible arrastre hacia otros baños, estos sistemas suelen llevar un filtro previo de carbón activado. Otro prefiltro de 20  $\mu\text{m}$  es habitual previo al filtro de carbón activado.

## 2.4.5. Mantenimiento de soluciones de proceso

### 2.4.5.1. Control de la concentración de los componentes del baño

Con el paso del tiempo los baños de proceso pierden progresivamente su eficacia a medida que las concentraciones de los componentes de los mismos bajan por debajo de ciertos niveles. Es una buena práctica operativa mantener las concentraciones de los componentes de la solución de trabajo analizando esta y adicionando nuevos componentes, asegurando de esa forma que el baño trabaja en sus condiciones de rendimiento óptimo y alargando al mismo tiempo la vida del mismo.

Es posible automatizar esta práctica implantando sistemas de dosificación automática, ya sea de forma temporizada, a caudal constante, proporcional al pH o rH, etc. Se deberá seleccionar los parámetros de dosificación y consigna en función de las características del baño en cuestión.

Además de los componentes esenciales del baño es preciso también controlar los componentes contaminantes que se originan a medida que se trabaja (metales indeseables, productos de descomposición orgánica de los aditivos, sales inorgánicas contaminantes como carbonatos, etc.), así como aquellos aniones perjudiciales que llegan al baño por arrastre (como cloruros, sulfatos, etc.).

### 2.4.5.2. Acciones sobre los electrodos.

Es frecuente que la diferencia en el rendimiento de los electrodos en los baños electrolíticos sea importante, siendo mayor la disolución de metal en el ánodo que la velocidad de electrodeposición en las piezas. Este hecho, generalmente observado en níquel electrolítico y cinc ácido, implica que la concentración metálica se incremente a menudo hasta niveles intempestivos, por lo que es recomendable vigilar estrechamente la concentración metálica en el baño y prevenir su aumento fuera de rango:

- intercalando ánodos insolubles o inertes entre los ánodos metálicos
- sustituyendo algunos ánodos solubles por ánodos de membrana conectados a corriente
- incrementando la superficie de los cátodos



- disminuyendo la superficie de los ánodos hasta alcanzar el equilibrio en el rendimiento anódico
- diluyendo el baño y corrigiendo las concentraciones de los componentes con adiciones de productos

#### **2.4.5.3. Filtración de soluciones de proceso**

Los baños electrolíticos suelen contaminarse de partículas sólidas que provocan defectos de rasposidad den las piezas. Para evitar este problema se debe filtrar las soluciones en continuo con filtros de papel en forma de discos, los cuales deben ser sustituidos por otros nuevos cuando se detecta un cambio en la presión del filtro.

#### **2.4.5.4. Eliminación de componentes orgánicos con carbón activado**

Los aditivos orgánicos que se adicionan a los baños electrolíticos para promover la nivelación y brillo de los recubrimientos sufren cierta descomposición en los procesos electrolíticos que conducen a subproductos contaminantes que deben ser oportunamente eliminados.

El carbón activo es particularmente eficaz en la eliminación de esta contaminación orgánica. Se aplica periódicamente a los baños añadiéndose directamente a los mismos y después de un tiempo de contacto se filtra para eliminar los restos de carbón con la contaminación orgánica adsorbida. Es frecuente también aplicar una descontaminación preventiva en continuo, para lo cual se combina la filtración de partículas sólidas con filtros a los que se les añadido carbón activado.

La aplicación más común es la referida a baños de níquel brillante muy sensibles a la contaminación orgánica y a todos aquellos procesos en los que se utilice alta carga de aditivos orgánicos.

#### **2.4.5.5. Retardo iónico en baños ácidos**

La técnica del Retardo iónico, aplicada sobre todo para la regeneración de decapados ácidos y baños de anodizado con sulfúrico, se utiliza para separar las sales metálicas que se van formando es dichas soluciones de su ácido original. Se hace pasar la solución a través de un lecho de resinas de intercambio iónico de carácter aniónico fuertemente básica. La resina retiene los aniones dejando pasar los metales catiónicos. El ácido se recupera eluyendo la resina con agua desmineralizada, obteniéndose un eluato rico en ácido y pobre en sal que se devuelve al baño ácido original. Se alcanzan rendimientos de recuperación entre el 40 y el 60 % del ácido. La fracción resultante de hacer pasar el ácido por la resina, la cual es rica en metal y con bajo contenido en ácido se neutraliza para precipitar el metal contenido.

#### 2.4.5.6. Cristalización de sales en soluciones de proceso

Las técnicas de cristalización pueden utilizarse para extraer de las soluciones de procesos materias valorizables o para eliminar contaminantes inorgánicos en sus formas insolubles. También pueden darse casos en que el contaminante inorgánico a eliminar sea al mismo tiempo un producto valorizable.

Mediante esta técnica se cristalizan por precipitación aquellas sales, como carbonatos y sulfatos metálicos, que presenten una baja solubilidad. Generalmente el proceso de precipitación se promueve haciendo bajar la temperatura de la disolución ya que la solubilidad de la mayoría de las sales se reduce con la bajada de la temperatura. Normalmente, con esta técnica, se rebaja la temperatura de los baños por debajo de 5 °C.

La aplicación quizás más empleada es la cristalización de sulfato ferroso en soluciones de decapado formuladas con ácido sulfúrico. En este caso es posible alcanzar la saturación tanto mediante el enfriamiento de la solución como mediante el caliente, ya que la solubilidad del sulfato ferroso en medio ácido crece con la temperatura hasta un punto en el cual desciende en picado, momento en el que se produce la precipitación del sulfato ferroso. Esta sal puede después utilizarse como reactivo en sistemas de tratamiento de aguas residuales.

También se aplica la técnica para la separación de aluminio en baños alcalinos de matizado de aluminio que no aditivan complejantes. El baño se conduce periódicamente a un cristizador para separar el metal en forma de aluminato insoluble. Los cristales separados se filtran y pueden ser también valorizados en forma de alúmina. La sosa regenerada puede volver a ser utilizada en el proceso de matizado.

Finalmente también se utiliza en la eliminación de carbonatos en baños cianurados de cobre y latón.

#### 2.4.5.7. Intercambio iónico para eliminar contaminación metálica

Los contaminantes metálicos que se acumulan en los baños electrolíticos reducen su eficacia y producen depósitos defectuosos.

La eliminación de estos metales, tales como Fe, Cr(III), Cu, Ni, Zn o Al puede realizarse haciendo pasar las soluciones de proceso por columnas de resinas de intercambio iónico catiónicas.



Una aplicación muy utilizada es para los baños de cromo decorativo. En este caso, no se hace pasar el baño original por las columnas de resinas, ya que el carácter fuertemente oxidante del crómico, a las concentraciones de trabajo del baño puede hacer que se deterioren las resinas. En su lugar se tratan los dos enjuagues estáticos de recuperación subsiguientes, mucho menos concentrados.

Se obtiene una solución de crómico, libre de metales contaminantes, que puede recuperarse directamente sobre el baño. El eluato procedente de la regeneración de las resinas con ácido se conduce hacia la instalación de tratamiento de aguas residuales o se gestiona externamente como residuos peligroso.

#### 2.4.5.8. Electrolisis para eliminar contaminación metálica

Ciertos metales contaminantes también pueden ser eliminados de las soluciones e proceso aplicando procesos de electrolisis a baja densidad de corriente, en las cuales el metal se deposita selectivamente en un cátodo de sacrificio. La misma técnica puede aplicarse también para la eliminación por oxidación anódica de contaminantes orgánicos, utilizando para ello ánodos inertes.

Según lo expuesto las técnicas electrolíticas de eliminación de contaminantes se pueden clasificar en:

- eliminación catódica por reducción de metales, los cuales se pueden valorizar posteriormente
- eliminación anódica de contaminantes orgánicos
- regeneración anódica de soluciones oxidantes agotadas

El proceso se aplica generalmente en cubas fuera de línea en las que se les aplica una corriente eléctrica con un cátodo y un ánodo. En el cátodo se reduce el metal contaminante y en el ánodo se oxida la materia orgánica u otros componentes como pueden ser los cianuros.

La regeneración anódica de soluciones oxidantes suele utilizarse para regenerar los baños de mordentado, formulados con ácido crómico, usados en los procesos de cromado de plásticos. A medida que el baño va trabajando, oxidando el butadieno del ABS, se va cargando en cromo trivalente. Cuando se alcanzan concentraciones entre 20 a 30 g/l el baño pierde su eficacia debiéndose sustituir por un baño nuevo y generándose un grave problema de residuo peligroso. Es por ellos que se aplica la regeneración anódica para reoxidar el cromo trivalente devolviendo al baño su eficacia. El proceso se lleva a cabo en cubas con membranas cerámicas también llamadas vasos porosos donde no solo se reoxida el cromo sino que también se oxida los productos orgánicos de degradación del ABS.



### **2.4.5.9. Mantenimiento de soluciones de desengrase**

La principal causa de agotamiento de los baños de desengrase es la acumulación de los aceites y grasas procedentes de la limpieza de las piezas. La separación de estos aceites en continuo o por cargas permite alargar significativamente la vida de estas soluciones.

En lo que sigue se presentarán algunas alternativas viables que permiten mantener los baños de desengrase en sus condiciones operativas óptimas.

#### ***2.4.5.9.1. Filtración con filtros de celulosa***

Haciendo pasar en continuo la solución de desengrase por un filtro de celulosa es posible separar los aceites libres del baño de desengrase. Para eliminar los aceites emulsionados haría falta una rotura de la emulsión previa, con lo que no sería factible entonces recuperar el baño nuevamente.

Debido a la limitación expuesta, la técnica es aplicable cuando se utilizan procesos de pre-desengrase con soluciones con escasa capacidad emulsionante, de tal forma que los aceites separados se encuentren en su forma libre.

#### ***2.4.5.9.2. Separación física de aceites libre***

Otra forma sencilla de eliminar los aceites libres es mediante una separación física por flotación. Para ellos se utilizar una cuba accesoria a la que se bombea la solución y en la que se deja en reposo para que se produzca la flotación de los aceites. El aceite flotante puede ser retirado por medio de cintas oleofilas que arrastran el aceite fuera de la cuba para su separación.

#### ***2.4.5.9.3. Centrifugación en la eliminación de aceites***

La separación de aceites no emulsionados en desengrases también puede realizarse por centrifugación llevada a cabo a velocidades de rotación elevadas, del orden de 7.000 rpm. Con esta técnica se consigue además las partículas sólidas mayores de 8  $\mu$ m presentes en el desengrase.

Dado que la separación se limita a los aceites libres uno es una técnica aplicable a desengrases con un alto poder emulsionante. Tampoco se aplica en el caso de desengrases ácidos de pH por debajo de 2.



#### **2.4.5.9.4. Filtración por membrana (ultra –o micro filtración)**

Las técnicas anteriormente expuestas se aplican para separar los aceites libres presentes en los desengrases. Cuando se requieren extender la separación a los aceites emulsionados sin necesidad de romper la emulsión por vía química es preciso acudir a las técnicas que membranas como la ultrafiltración y a microfiltración. Estas son técnicas de separación que utilizan como elemento separador membranas semipermeables, microporosas, cuya naturaleza puede ser orgánica o cerámica. Las membranas retienen los aceites y dejan pasar la solución desengrasante que puede volver a ser utilizada.

La diferencia fundamental entre ambas técnicas se encuentra en el tamaño de los poros de las membranas. Así en la microfiltración encontramos tamaños de poros entre 0,1 y 10 micras, mientras que en la ultrafiltración podemos llegar a tamaños en el intervalo entre 0,01 $\mu$ m y 0,1 micras. La diferencia en el tamaño de poro implica que la microfiltración pueda aplicarse a la retención de partículas y coloides y aceites de alto peso molecular, mientras que la ultrafiltración se aplique en la separación de aceites de medio y bajo peso molecular.

La filtración se produce de forma tangencial a la membrana ya que el desengrase sucio discurre paralelamente a las membranas, concentrándose cada vez más en aceites mientras que la solución limpia, también llamada permeado, pasa perpendicularmente a través de la membrana.

Generalmente se aplica la técnica en combinación con técnicas sencillas de separación de los aceites libres antes descritas, como la flotación y/o la aplicación a bandas oleofilas.

#### **2.4.6. Recuperación de metales**

Es posible recuperar algunos metales directamente en proceso, para utilizarlos nuevamente en el mismo o para valorizarlos externamente, aplicando las técnicas disponibles que se describen en lo que se sigue.

##### **2.4.6.1. Recuperación electrolítica de metales**

Los metales a recuperar pueden reducirse y depositarse en el cátodo de una celda electrolítica. Después, puede separarse del cátodo por medios mecánicos o químicos. Finalmente, el metal separado debe refinarse para reciclarse en el proceso original o para valorizarlo externamente.

En teoría, sería posible recuperar cualquier metal disuelto a excepción del cromo, pero

sobre todo se emplea, aunque no en exclusiva, para la recuperación de metales preciosos donde el alto valor del metal justifica sobradamente la inversión. Puede utilizarse también para la recuperación de otros metales como níquel y cobre.

Adicionalmente a la reducción del metal, es posible aprovechar también la oxidación que se produce en el ánodo para destruir algún componente de la solución especialmente contaminante como pueden ser los cianuros.

#### **2.4.6.2. Resinas de intercambio iónico en recuperación de metales**

Cuando se trata de recuperar metales preciosos en soluciones muy diluidas donde el rendimiento catódico sea muy bajo es necesario concentrar previamente el metal, para lo cual se pueden emplear resinas de intercambio iónico que retengan el metal, dejando pasar el resto de iones.

Las resinas utilizadas pueden ser del tipo quelante, en cuyo caso se recupera el metal mediante la incineración de la resina.

Si no se utilizan resinas quelantes sino las convencionales se aplica el sistema clásico de regeneración química de las resinas. En el eluato de la regeneración se encontrarán los metales mucho más concentrados que en la disolución original que pueden ser, ahora sí, recuperados con un sistema electrolítico.

Lo más habitual es que la gestión de la resina y la recuperación posterior del metal se realicen a través de gestores de residuos autorizados para tal fin.

A continuación se muestra un mapa de técnicas y tecnologías susceptibles de ser utilizadas para la mejora de la eficiencia de los procesos de tratamiento de superficies y mejora medioambiental. No se contemplan las energéticas por ser tratadas en el siguiente apartado de este entregable

**MAPA DE TECNICAS EMPLEADAS**

	OPTIMIZACION ARRASTRES	TRATAMIENTO AGUAS Y BAÑOS	RESIDUOS
<b>Electrolíticos</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Aclarados estancos</li> <li>- Aclarados ECO</li> <li>- Enjuagues en cascada</li> <li>- Enjuagues por aspersión</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Tratamientos</li> <li>- Precipitación</li> <li>- Intercambio iónico</li> <li>- Osmosis inversa</li> <li>- Tratamientos electrolíticos</li> <li>- Tratamiento integrado</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Fangos</li> <li>- Emisiones atmosfera</li> </ul>
<b>Inmersión en caliente</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Prolongación de Baños</li> <li>- Desengrase</li> <li>- Decapado</li> <li>- Inhibidores</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>- Valorización</li> <li>- Matas, cenizas,..</li> <li>- Depuración aire libre</li> </ul>
<b>Sistemas de gestión</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Programación</li> <li>- Colgado de piezas en racks</li> <li>- Control calidad</li> <li>- Minería de datos</li> <li>- Sistemas información</li> </ul>		

Elaboración propia

Figura 9. Técnicas eficiencia de proceso tratamiento superficies. Fuente AIDIMME

TRATAMIENTO	VENTAJAS	INCONVENIENTES	USOS BAÑOS
<b>Intercambio iónico</b>	Reducción costes tratamiento Ahorro agua	Perjudicada por aceites y grasas	Cobre Zinc Níquel Cromo Plata, Oro
<b>Electrolisis</b>	Recupera Cu metálico Reduce contaminación Reduce costes depuración y lodos No necesita reactivos	Elevado coste energético Cinética moderada Termodinámica mala	Cobre Zinc Níquel Cromo Plata, Oro...
<b>Evaporación Atmosférica</b>	Recupera materia prima Inversión moderada Reduce vertido Reduce costes depuración, agua y canon	Elevado coste energético Aumenta frecuencia renovación baños Necesita muchas cubas	Níquel Cromo
<b>Electrodialisis</b>	Recupera materia prima Reduce coste de tratamiento	Elevada inversión Elevado coste energético Poca implantación	Cromo
<b>Osmosis inversa</b>	Recupera materia prima Reduce costes depuración Ahorro agua No consume reactivos	Vida limitada membranas Energía para presión	Plata, Oro, Met. Preciosos Pasivado Cromo
<b>Retardo Iónico</b>	Alarga vida del baño Calidad constante Reduce consumo energía No consume reactivos	Elevada inversión Efluente rico en aluminio	Anodizado Aluminio SO <sub>4</sub> H <sub>2</sub>

Tabla 51. Ventajas e inconvenientes en tipos de tratamiento. Fuente AIDIMME

## 2.5. Mapa de tecnologías de digitalización para la eficiencia de proceso

Como puede apreciarse, la mayor parte de procesos involucran reacciones químicas combinadas con procedimientos mecánicos de movimiento de cargas o movimiento de fluidos. Igualmente, las técnicas que se utilizan para mejorar la eficiencia del proceso utilizan los mismos principios que los propios procesos y en algunas ocasiones implican una modificación sustancial de las instalaciones.

Si únicamente se estuviese persiguiendo la mejora de la eficiencia, cabría contemplar como posibles opciones cualesquiera de las técnicas enumeradas anteriormente. Sin embargo, sado que el proyecto persigue la utilización de tecnologías de digitalización encuadradas en el marco de la Industria 4.0, se debe tomar otra perspectiva para desarrollar el mapa de tecnologías que servirá de base para el posterior desarrollo de la herramienta de evaluación.

A partir de los procesos de fabricación sectoriales y de las medidas de eficiencia de procesos indicadas anteriormente, se han seleccionado las tecnologías más viables de mejora considerando el eje de la digitalización.

Técnicas de mejora	Gestión	Monitorización	Inteligencia/Automatización
DISEÑO DE BASTIDORES Y POSICIONAMIENTO DE PIEZAS	Rediseño de los sistemas de amarre en bastidores	Tracking de posicionamiento y carga. Monitorizar resultados	Automatizar carga del bastidor. Análisis de resultados según llenado y posición de cada pieza..
GESTIÓN DE ENTRADAS	Auditoría EE. Aislamiento baños	Monitorizar consumo, temperaturas, pérdidas de calor.	Modelizar proceso. Automatizar acciones
CONSUMOS DE AGUA	Acondicionamiento previo. Calidad del enjuague	Control de variables de baño y consumo de agua	Automatizar caudales de agua y tiempos de enjuague
REDUCCIÓN DEL ARRASTRE	Disposición de piezas. Gestión de tiempos de escurrido y viscosidad de baños	Monitorización de viscosidad, concentración, temperatura y bastidores	Modelos predictivos de arrastre
ENJUAGUE	Definir metodología para conseguir enjuague de calidad. Seleccionar modelo adecuado de enjuague	Control de concentración, pH, temperatura y resultados	Modelizar procesos de enjuague. Ajustar proceso a necesidades
MANTENIMIENTO DE SOLUCIONES DE PROCESO	Evaluar metodología actual y resultados conseguidos. Ajustar.	Control de concentraciones, temperatura, pH, electrodos.	Modelizar proceso en conjunto y gestionar alternativas en función del modelo

*Figura 10. Mapa tecnologías digitales en proceso tratamiento superficies. AIDIMME*

En el eje horizontal pueden apreciarse tres niveles diferentes de digitalización: el primero responde a la pura gestión de los procesos mediante tecnologías informáticas básicas, el segundo trata de dar respuesta a la pregunta sobre “qué está pasando” en el proceso (control y monitorización), y el tercer nivel trata de responder tanto al por qué están pasando las cosas (análisis) como al qué pasará (predicción).

De alguna forma, estos tres niveles son los que actualmente se consideran viables para mejorar la eficiencia de este tipo de procesos, considerando la tecnología productiva actual.

También puede apreciarse que determinadas acciones de control que se ejercen sobre el proceso pueden ser comunes a varias técnicas de mejora, lo cual es más que razonable ya que existe una cantidad relativamente pequeña de variables de proceso que tienen alguna incidencia en la eficiencia del mismo.

### **3. Eficiencia Energética en industria y subsector**

En este apartado se ha realizado una breve introducción referente al sector y al subsector a los que está enfocada la herramienta de autodiagnóstico digital e interactiva. Con esto se pretende conocer mejor el sector metalmeccánico y el subsector del galvanizado y poder así definir con un mayor grado de detalle las diferentes técnicas o métodos de gestión y eficiencia energética horizontales que se pretende seleccionar y ordenar en este entregable. Gracias a todo lo anterior, se podrá analizar su implantación por medio de tecnologías de Industria 4.0.

#### **3.1. Eficiencia Energética en la Industria: Sector Metalmeccánico.**

El sector metalmeccánico engloba una de las industrias básicas más importantes de un país industrializado, siendo la energía parte fundamental de su desarrollo. Aunque este sector no es especialmente intensivo en el uso de la misma, algunos de sus procesos requieren de forma específica del uso de energía eléctrica y térmica, principalmente. Es por ello un sector muy heterogéneo, donde se desarrollan actividades económicas muy diferentes con el mismo fin: fabricar, reparar o instalar productos de metal, haciendo esto que las tecnologías utilizadas sean muy similares.

En 2008, la industria del sector del metal en España generó alrededor del 9% del PIB, representando el 40% de la producción industrial de España y el 50% de todas las exportaciones en un sector compuesto por más de 150.000 empresas donde la mayoría son PYMES.

Es uno de los principales sectores productivos de la Comunidad Valenciana, siendo importante no solo por el volumen de producción o empleo que genera, sino también por la dependencia que tienen otros sectores de los productos y servicios que se desarrollan en las empresas que pertenecen al mismo. En el año 2008, el sector empleó unas 65.000 personas, teniendo en cuenta que muchas de las empresas no alcanzan los 20 empleados. Es el cuarto sector en potencia de España.

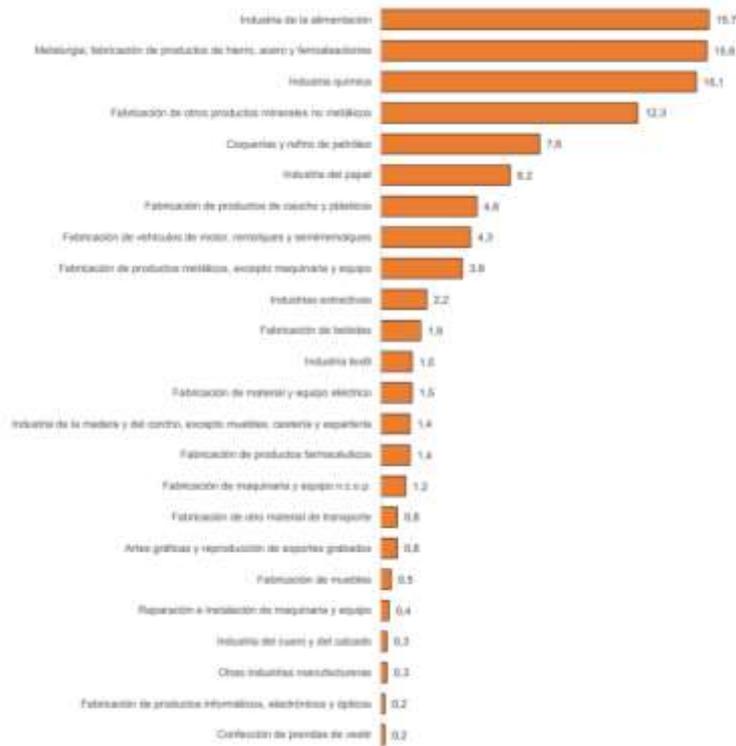


Figura 11. Consumo energético porcentual por sectores industriales. INE

El consumo de energía ha ido creciendo de manera exponencial en España, ya que las empresas se han centrado en incrementar la producción y las ventas y el consumo energético se ha dejado en un segundo plano. Debido a esto y a una más alta concienciación de las empresas se han ido desarrollando en los últimos años políticas de ahorro en el consumo de energía con el objetivo de potenciar el desarrollo sostenible. Para ello se han potenciado las energías renovables, se utilizan máquinas más eficientes, se han optimizado multitud de procesos e incluso existen empresas que monitorizan sus consumos de manera automática, basando su producción en la interpretación de estos datos.

### 3.2. Técnicas para eficiencia y gestión energética en industria

A continuación se exponen una serie de técnicas que pueden aplicarse en la industria en general y, más concretamente, en el subsector que nos ocupa, tras haber efectuado una preselección en base a criterios de importancia de implantación definidos por el personal técnico del proyecto. Se busca así que las técnicas seleccionadas permitan definir un contexto de evaluación en el que la herramienta pueda determinar el grado de implantación a la industria 4.0 de cada empresa. A partir de ahí, se podría proporcionar a la empresa información de medidas concretas y órdenes de magnitud de coste y tiempo de retorno de la inversión para cada una de ellas.

Tras esta preselección, se enumerarán, combinarán y, en su caso, descartarán, las que se consideren más interesantes para la resolución de este proyecto. De esta manera se busca englobar los aspectos más relevantes de eficiencia y gestión energética en la industria y poder así valorar de forma más precisa la adaptación de las diferentes empresas a la industria 4.0 a nivel energético en fases posteriores del proyecto.

La metodología seguida en la preselección, clasificación y presentación se puede resumir en la adopción de los dos criterios siguientes:

1. Por un lado, se plantea una clasificación individual de cada técnica en función del ámbito de aplicación de ésta, creando así a un código de colores resumido más adelante.
2. Por otro lado, se enumerarán las técnicas desde aquellas más generales y extendidas hasta las técnicas más avanzadas y orientadas a la gestión, valorándolas de una manera general. Al mismo tiempo, se trata de guardar una agrupación en cuanto a campos de aplicación de las distintas técnicas. Ello no quiere decir que el nivel de desarrollo de una técnica de implantación general no pueda llegar a superar a la complejidad en la adopción de una técnica de mayor volumen de tratamiento de datos, al menos a priori. Se pretende así tener una primera aproximación, una valoración general sobre la que fundamentar un análisis posterior en detalle.

Técnicas de análisis y optimización económica	
Tecnologías alternativas y energías renovables	
Tecnologías y técnicas directas de eficiencia energética y ahorro	
Técnicas avanzadas de gestión y planificación	

Tabla 52. Clasificación individual técnicas seleccionadas. Fuente ITE

La siguiente figura refleja un esquema resumen contemplando dichos criterios de clasificación, estructurada según se van a desarrollar seguidamente en el documento:

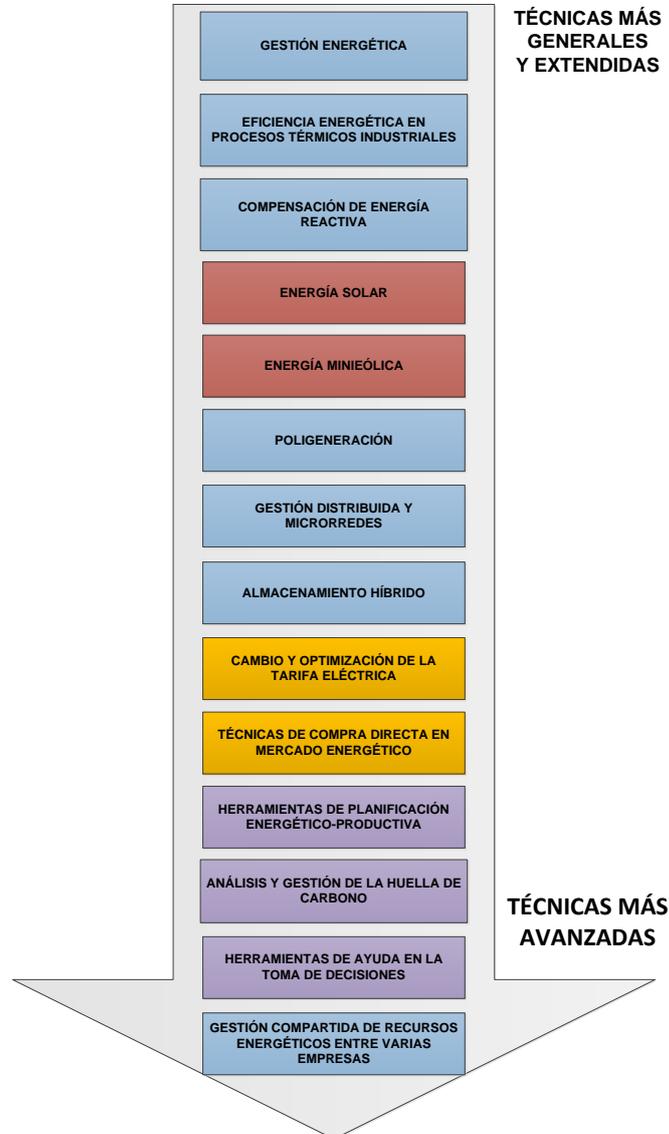


Figura 12. Metodología de análisis de las técnicas preseleccionadas. ITE

A continuación se describen brevemente cada una de las técnicas recopiladas según la metodología planteada, con el objetivo de conocer sus principales características y analizar su relevancia en el sector metalmecánico y en el subsector del galvanizado.

### 3.2.1. Gestión energética

La gestión energética busca implantar paulatinamente un sistema de caracterización y monitorización de los consumos de la planta. Por lo general, para la implantación de un sistema de gestión energética se debe comenzar por una fase de recopilación de datos de consumo, seguida de una fase de mediciones y culminada con un análisis



global de la situación existente, las medidas para alcanzar la situación deseada y el ahorro asociado, entre otros beneficios.

Implantar esta técnica es altamente recomendable para las empresas, si no vital, porque constituye el primer paso a una monitorización de parte o el total de procesos de la planta, cuyos datos pueden eventualmente ser integrados en tiempo real en un software de planificación. Ello conlleva una serie de ventajas tales como la posibilidad de actuación en base a la información disponible, la identificación de consumos críticos y/o problemas de otra índole, y la posibilidad de correlacionar todo lo anterior con otras variables tales como la producción.

Al mismo tiempo, esta técnica requiere de un diseño personalizado del sistema de adquisición de datos, tratamiento de datos e integración de la información que se va obteniendo de todos los sistemas de medida que se incluyen.

### **3.2.2. Eficiencia energética en procesos térmicos industriales**

Aunque en los últimos años han surgido diferentes mejoras tecnológicas que han supuesto un verdadero avance a nivel de eficiencia energética, los procesos industriales aún no son totalmente eficientes en el uso del calor. Dado que las pérdidas por calor pueden llegar a ser cuantiosas, las técnicas de mejora y optimización de equipos y procesos para minimizarlas suelen ser siempre una buena inversión. Las actuaciones en este sentido suelen ser bastante inmediatas, tales como la mejora del aislamiento, la utilización de nuevos y mejores fluidos refrigerantes o la utilización de tecnologías más eficientes o novedosas, como la recuperación de calor de gases de escape.

En altos grados de implantación, la monitorización y mejora de dichos procesos se integrará en el sistema general de gestión energética de la empresa (SGE), aportando así valiosos datos para considerar el impacto de potenciales medidas de ahorro en los flujos térmicos de los procesos optimizados.

### **3.2.3. Compensación de energía eléctrica reactiva**

La potencia reactiva es aquella consumida por los motores, transformadores y todos los dispositivos o aparatos eléctricos que poseen algún tipo de bobina para crear un campo electromagnético. Esas bobinas, que forman parte del circuito eléctrico, constituyen cargas para el sistema eléctrico que consumen tanto potencia activa como potencia reactiva y la eficiencia de su trabajo depende el factor de potencia. Mientras más bajo sea el factor de potencia (más alejado de la unidad) mayor será la potencia reactiva consumida.

La compensación debe hacerse por ley mediante la conexión de un grupo de condensadores, y por lo general, su instalación suele ser siempre recomendable, ya que las penalizaciones por consumo de reactiva pueden ser cuantiosas, frente a lo asequible de un equipo de compensación correctamente elegido según el caso.

### 3.2.4. Sistemas de aprovechamiento de la energía solar

La energía solar fotovoltaica representa la opción de desarrollo a futuro. Sin embargo, a día de hoy no ha alcanzado aún su madurez a nivel de tecnología, rendimiento y coste. Ello no impide que la instalación de paneles solares fotovoltaicos crezca con el paso de los años. Factores como la radiación solar de la zona, la orientación e integración de dichos paneles o la inversión en equipos, representan a día de hoy los grandes condicionantes en la puesta en marcha de proyectos de esta índole. Sus beneficios son, por otro lado, numerosos y directos, ya que permiten aliviar el consumo de red, verter a ésta si hay excedentes o almacenar para consumir en otro momento.

De la misma manera, la energía solar térmica se encuentra en un grado de desarrollo tecnológico creciente que, en base a criterios semejantes a la solar (excepto en el consumo térmico o de ACS característico de la empresa), hace que plantear su implantación resulte interesante en la mayoría de casos.

### 3.2.5. Sistemas de generación de energía eléctrica mini-eólica

La energía eólica es, junto a la energía solar, la renovable más desarrollada y con mayor aplicación. Así, si se habla de turbinas eólicas, las más adecuadas para la generación distribuida son las máquinas de pequeña o media potencia, encuadradas dentro del concepto de energía minieólica (Potencia menor o igual a 100kW). Estas turbinas se conectan en redes de distribución de Baja Tensión con lo cual se pueden instalar junto al punto de consumo eléctrico. La instalación de aerogeneradores minieólicos de última generación mejora la calidad del suministro eléctrico en la red de distribución y proveen de estabilidad a la misma, especialmente cuando se trata de redes de distribución débiles.

Como contrapuntos, destacar que es una tecnología que suele tener unas bajas prestaciones, baja fiabilidad y con una rentabilidad bastante baja, lo que la hace poco atractiva para las empresas. Los ruidos y el impacto ambiental suponen también otro problema con el que lidiar.

### 3.2.6. Poligeneración

La poligeneración consiste en la producción conjunta de dos o más productos, de manera simultánea y buscando aprovechar al máximo el potencial de los recursos

consumidos. Los sistemas de poligeneración se caracterizan por ser siempre multiproducto, a veces multirecurso y por evitar en lo posible la formación de residuos.

Esta técnica se subdivide a su vez en cogeneración (electricidad y calor), trigeneración (electricidad, calor y frío) y cuatrigeneración (electricidad, calor, frío y captura de CO<sub>2</sub>), y cada una de ellas permite aprovechar al máximo la energía consumida, reducir el coste unitario del producto y disminuir el impacto ambiental.



Figura 13. Esquema genérico de un sistema de poligeneración. Fuente: ITE

### 3.2.7. Generación distribuida y micro redes

La generación distribuida consiste en generar energía eléctrica mediante la instalación de diversas fuentes de energía de pequeñas y medianas potencias, las cuales deben estar ubicadas lo más cerca posible de donde se produce el consumo. Actualmente, hay una cierta tendencia al reemplazo de los sistemas centralizados por sistemas distribuidos. En este punto se pretende valorar, más allá de la viabilidad de las fuentes de generación en sí, su interconexión, gestión y adaptación del sistema a éstas.

Las micro redes se auto gestionan localmente, utilizando tecnologías digitales e incorporando en algunos casos fuentes de energía renovables. Estos sistemas permiten un uso más eficiente de la energía, de ahí que se aconseja la adaptación a este tipo de sistemas de las redes de distribución a largo plazo. Es importante conocer la regulación estatal correspondiente para analizar la posible adaptación.



Figura 14. Generación distribuida y microrredes. Fuente: ITE

Las técnicas que se han propuesto dentro del campo de auto-generación, dónde se engloban las energías renovables, son las más relevantes y las que tienen una mayor aplicación en el sector industrial actual.

### 3.2.8. Hibridación de tecnologías de almacenamiento

Los sistemas de almacenamiento son una herramienta de apoyo a la industria ya que permiten realizar una gestión más eficiente de los recursos energéticos y facilitan la modulación de los consumos globales de la instalación.

Los principales objetivos que deben ser cubiertos por los sistemas de almacenamiento son:

- Eliminar posibles desacoplamiento entre las horas en las que se produce la generación de energías renovables no gestionables y las horas en las que tiene lugar el consumo la energía dentro de la empresa.
- Mantener el suministro eléctrico en el caso que se produzca algún fallo en la línea de suministro.
- Modular el consumo de toda la instalación para consumir energía de la red en las horas en las que el precio es menor y consumir de la energía almacenada en las baterías cuando el precio de la energía es mayor.
- Reducir los requerimientos de potencia contratada amortiguando el impacto de los picos de potencia que puedan provocar determinadas máquinas en la instalación.

La elección de la tecnología de almacenamiento más apropiada es función del objetivo que se desea alcanzar. Es por ello que las soluciones que contemplan la posibilidad de hibridar distintas tecnologías de almacenamiento dentro de una misma solución

suponen una ventaja competitiva para la industria ya que se benefician de distintos objetivos mejorando la rentabilidad de la instalación.

### 3.2.9. Cambio de tarifa eléctrica

En el sector del galvanizado, el consumo energético supone una parte importante de los costes asociados al producto terminado. Es por ello que es muy importante que la tarifa eléctrica que se tenga contratada se ajuste a las necesidades reales de cada industria.

La factura eléctrica se compone de dos términos que deben ser analizados y ajustados para cada una de las empresas. El primero de ellos está relacionado con la potencia contratada relacionado con la instalación y, en este caso, se debe analizar los históricos registrados por el maxímetro y que aparecen en las facturas. Para el ajuste del término de potencia se debe tener en cuenta la siguiente restricción asociada a la relación que debe cumplir la potencia contratada en cada uno de los periodos tarifarios:

$$P1 \leq P2 \leq P3 \leq P4 \leq P5 \leq P6.$$

Respecto al término de energía, está relacionado con el coste de la energía que se consume en la industria. En este caso existe una gran variedad de alternativas que van desde un precio único para todas las horas del día hasta la posibilidad de comprar la energía directamente en el mercado eléctrico regulado por OMIE. La elección de una alternativa u otra dependerá del perfil de consumo que tenga la industria, de su capacidad para adecuar su consumo al precio de la energía y de la disposición o no de herramientas que les faciliten la gestión de la compra de energía.

### 3.2.10. Compra directa de la energía eléctrica en el mercado eléctrico

En aquellas industrias para las que el consumo de energía eléctrico es elevado y tienen posibilidad de ajustar sus procesos productivos a las variaciones horarias del precio de la energía eléctrica, la opción de la compra directa en el mercado eléctrico regulado por OMIE puede suponer una importante reducción de los costes de producción.

La compra de la energía en el mercado eléctrico se realiza a través de personal autorizado que recibe el nombre de agentes de mercado. En el caso que una empresa desee hacerse agente de mercado, para la compra directa de energía sin intermediarios, debe acreditar capacidad legal, técnica y económica para realizar dicha actividad.

- Acreditar capacidad legal. Las empresas que realizan la actividad de comercialización deben de ser sociedades mercantiles debidamente inscritas en el registro correspondiente o equivalente en su país de origen, en cuyo



objeto social se acredite su capacidad para vender y comprar energía eléctrica sin que existan limitaciones o reservas al ejercicio de dicha actividad.

- Acreditar capacidad técnica. Las empresas deben cumplir los requisitos exigidos a los sujetos compradores en el mercado de producción de energía eléctrica conforme a los Procedimientos de Operación Técnica y, en su caso, las Reglas de Funcionamiento y Liquidación del mercado de producción.
- Acreditar la capacidad económica. Las empresas deben presentar ante el Operador del Sistema y ante el Operador del Mercado las garantías que resulten exigibles para la adquisición de energía en el mercado de producción de electricidad en los Procedimientos de Operación Técnica y en las correspondientes Reglas de Funcionamiento y Liquidación del Mercado respectivamente

### **3.2.11. Planificación de la producción (CRP) + técnicas gestión de la demanda**

Los sistemas de gestión de las empresas están cada vez más extendidos e integrados en su gestión debido a las ventajas y los beneficios percibidos por la empresa al tener la información de todos los departamentos interconectada en tiempo real.

Gran parte de estos sistemas de gestión integral (ERP) incluyen un módulo específico de ayuda a la planificación de la producción (CRP) el cual se basa en el plan maestro de producción y en la disponibilidad de material y recursos para los próximos meses o semanas.

En el caso de sectores en los que el consumo eléctrico es elevado, y siempre que el proceso de producción lo permita, una solución atractiva desde el punto de vista de ahorro económico es el incorporar las variaciones horarias del precio de la energía como entrada a la planificación de la producción. De esta forma, dicha planificación se ajustará para que el coste del producto terminado, desde el punto de vista energético, sea lo menor posible.

### **3.2.12. Cálculo y gestión de la huella de carbono**

La huella de carbono es un indicador que mide la emisión de gases GEI y emisiones de CO<sub>2</sub> que se emiten a la atmósfera. El procedimiento de determinación y gestión de la huella de carbono tiene distintos alcances y puede llegar a considerar muchos factores que influyen en emisiones, ya sean directas o indirectas. Por otro lado, sus beneficios para la empresa son múltiples, entre los que destaca una mejora competitiva clara, una mejora de la imagen empresarial, una mejora forzosa de la eficiencia y la seguridad de prevenir a futuro en materia de legislación ambiental, al haber dado ya los pasos necesarios para definir y controlar sus emisiones.



Figura 15. Huella de carbono Fuente: Compensaforest

### 3.2.13. Herramientas de ayuda a la toma de decisiones

Muchas de las técnicas descritas para la mejora de la eficiencia y de la gestión energética resultan difíciles de implementar de forma eficiente sin la existencia de una herramienta externa que facilite la gestión de dichos recursos.

Las herramientas de ayuda a la toma de decisiones tratan de recopilar la máxima información posible sobre el proceso que se desea gestionar para, tras un proceso de análisis de la información, presentarla de forma simplificada y sencilla al usuario de la misma para que él pueda decidir las acciones a realizar sobre la instalación.

En función del grado de complejidad integrado en este tipo de herramientas, la información presentada se puede corresponder con una serie de indicadores clave (KPI) sobre la instalación o sobre variables del entorno (como por ejemplo el precio horario de la energía) o, en el caso de herramientas más complejas, pueden llegar a proponer acciones concretas resultantes de algoritmos de optimización multicriterio.

### 3.2.14. Gestión compartida de recursos energéticos conjunto de empresas

La gestión compartida de recursos energéticos (EERR, almacenamiento, cogeneración, mercado eléctrico...) supone una mejora de la eficiencia energética de dichos recursos ya que se realiza un mejor aprovechamiento de los mismos. Este hecho unido a la reducción de los costes unitarios asociados a la economía de escala



(instalaciones de mayor tamaño tienen menores costes por unidad de energía) hacen de esta opción una alternativa atractiva para muchas empresas interesadas en reducir el coste asociado a la energía eléctrica.

Teniendo esto en cuenta, se pueden identificar dos modelos de negocio asociados a esta forma de trabajar. El primero de ellos se basa en un modelo en el que cada empresa es propietaria de una instalación y la pone al servicio del resto de empresas asociadas. En el segundo modelo, existe una instalación única que pertenece al conjunto de empresas y que se comparte entre todas ellas.

En cualquiera de los casos, la gestión compartida de recursos energéticos requiere la formalización de contratos complejos entre las partes implicadas y la instalación de un sistema también complejo de medida que permita administrar correctamente la utilización de dichos recursos entre todas las empresas implicadas.

### 3.3. Criterios de selección y estructuración de las técnicas más relevantes

Tras haber realizado una primera preselección y una caracterización de cada una de las técnicas desarrolladas en el apartado anterior, se procede a realizar una selección final de técnicas o grupos de técnicas a considerar de cara al diseño de la herramienta. Las premisas principales en la selección son las siguientes:

- 1) Se considera que, por importancia tanto general como por tipo de procesos característicos del sector objetivo, las técnicas de *gestión energética y eficiencia energética en procesos térmicos industriales* se deben evaluar de manera individual tanto del resto de técnicas como entre ellas.
- 2) Si bien la integración de energías renovables deben ser forzosamente consideradas en la valoración final, se ha decidido incluirlas dentro de *generación distribuida* por su relativamente bajo grado de implantación industrial. En este apartado se hará referencia pues tanto a las fuentes como a los métodos de integración de fuentes distribuidas de energía, entre ellas las renovables.
- 3) Tanto por la tipología de tecnología, para el caso del almacenamiento, como por las características de las técnicas de implantación para la optimización de tarifa y acciones sobre facturas, compraventa energética y mercado, se ha decidido desarrollar cada una de estas dos técnicas por separado.
- 4) Los casos de técnicas de empresa colaborativa, aunque poco extendidos y con una menor riqueza de soluciones respecto al resto de técnicas, suponen un grado de compromiso y digitalización a partes iguales que se estima muy

interesante evaluar en una empresa, aunque su peso en la valoración final no llegue a ser determinante.

### 3.4. Mapa de tecnologías de digitalización para la gestión y eficiencia energética

Como se ha comentado anteriormente, en este apartado se ha generado un mapa de tecnologías en el cual se plasman las técnicas, o una unificación de algunas de ellas, que finalmente se han seleccionado del punto anterior. Siguiendo los criterios y según lo expuesto en el apartado anterior, se han escogido finalmente seis técnicas. Éstas engloban gran parte de las técnicas que hoy en día están implementadas o son susceptibles de serlo en la mayoría de empresas de la industria objetivo. Por eso mismo, algunas de ellas tienen un componente de innovación elevado y son pocas las industrias que están trabajando en ellas.

El mapa de técnicas aplicables a la mejora de la eficiencia energética de la industria que han sido finalmente seleccionadas es el siguiente:



Figura 16. Mapa técnicas eficiencia según su grado de implantación digital. ITE



Como se aprecia, se ha listado cada una de las técnicas seleccionadas en un color diferente, y a su vez cada técnica se ha dividido en cuatro grados de implantación en la empresa:

- El nivel 0 engloba todos los pasos previos a dar: contratación de servicios, realización de informes y, en general, dimensionamiento del problema a abordar en la aplicación de dicha técnica
- Nivel 1: implantación de sistemas físicos de medición y gestión, obtención de datos reales y/o aplicación de medidas activas.
- Nivel 2: implantación de sistemas digitales de cuantificación, comparación y tratamiento de datos mediante software, generación de indicadores útiles y en general herramientas de ayuda en la toma de decisiones.
- Nivel 3: integración de sistemas de gestión, utilización de herramientas de Big Data, optimización, predicción y correlación del consumo energético con otras variables, como por ejemplo la planificación energético-productiva.

Asimismo, se pueden apreciar dos tonos de cada color; aquellos tonos claros reflejan un nivel en el que no se espera obtener beneficios directos de la inversión, tal es el ejemplo del desarrollo de estudios de viabilidad, de impacto, etc. Por otro lado, los tonos oscuros señalan aquellos niveles en los que sí se espera un beneficio asociado a la puesta en marcha de la medida, ya sea directa o indirectamente.

Una vez presentadas, se procede al desarrollo y explicación de los niveles asociados a cada una de las técnicas:

## **1. Gestión energética**

La gestión energética es, probablemente, la más importante de todas las herramientas de mejora energética de que una empresa dispone, considerando desde las primeras etapas de implantación de un SGE en la industria, hasta las últimas de monitorización y tratamiento y almacenamiento de datos en una base de datos integral.

En consecuencia, se emplea aquí la gestión energética como un concepto que abarca todas aquellas acciones destinadas a la estandarización, el control y la optimización del consumo de energía, englobando así a otras muchas técnicas. Algunas de ellas, como la auto generación de energía o la eficiencia energética en procesos industriales, se han decidido desarrollar como técnicas individuales por su importancia y la posibilidad de caracterizarlas más en detalle.

No obstante y como se puede apreciar en el esquema general, la gestión energética consideraría las siguientes medidas o acciones en cada uno de los niveles ya explicados:

- Nivel 0: Realización de auditorías energéticas, tanto totales como parciales. Ello puede incluir una larga lista de acciones, aunque se ha de valorar



especialmente todo aquello relativo a la caracterización energética de la planta (cuánta energía se consume, de qué forma, con qué eficiencia), la caracterización de consumos (recopilación general de información, listado de consumos, determinación o estimación de potencias y factores de utilización) y la elaboración de un plan de acción energético, contemplando aspectos como la eficiencia de los equipos examinados, el uso de las mejores tecnologías disponibles o la adopción de buenos hábitos energéticos.

- Nivel 1: Desarrollo e implantación de sistemas de monitorización. A diferencia de la etapa anterior, en la que las medidas obtenidas son habitualmente generales y diferidas en el tiempo, en este nivel se considera la obtención de medidas en tiempo real de aquellas variables que interese monitorizar, como el consumo de energía eléctrica activa y reactiva en una planta industrial, el consumo de gas natural en una máquina de quemado o la evolución de la temperatura ambiente en una oficina. No se considera aquí la actuación automática en función de los resultados de las medidas, que será desarrollada en niveles más avanzados.
- Nivel 2: Implantación de herramientas de ayuda en la toma de decisiones mediante el tratamiento de datos y la obtención de indicadores de desempeño energético (IDEs) así como de otros tipos de KPIs de interés en planificación tanto productiva como estratégica. Además, dichas herramientas están desarrolladas al nivel de presentar dicha información de forma automática, en un formato entendible por el usuario medio siendo, por ende, de utilidad para un perfil de usuario variable.
- Nivel 3: En este último nivel se consideran aspectos avanzados de la gestión a diferentes niveles, tanto energética como de la demanda, entre otros. El software ejecuta acciones de manera automática y realiza una planificación de la producción industrial según su consumo energético y económico, además de considerar el impacto de otras muchas variables, tales como la aportación de renovables o la interacción con el mercado. Este nivel constituye así el estado de desarrollo más alto en lo que a gestión energética se refiere.

## **2. Eficiencia energética en procesos térmicos industriales**

Como ya se ha explicado a lo largo del documento, el consumo de energía térmica suele ser crítico por las grandes pérdidas asociadas. Así, si bien este aspecto se podría encuadrar dentro de la técnica anteriormente considerada como Gestión Energética, se ha decidido presentar separadamente por la citada importancia, sobre todo en niveles bajos de implantación, en los que la mayor parte de las actuaciones tienen un impacto alto con una inversión moderada.



- Nivel 0: En este nivel se incluirían todos aquellos estudios de viabilidad, rendimiento y pérdidas, conducentes a estimar el impacto energético y económico de la implantación de la medida en cuestión (ahorro económico potencial, emisiones evitadas, retorno de la inversión, etc), así como beneficios de otra índole (mejora potencial en la calidad final gracias al mayor rendimiento de los equipos, selección de fuentes de energía térmica más baratas, mejoras de proceso, etc).
- Nivel 1: Implantación de las medidas propuestas en el nivel anterior y desarrollo de medidas avanzadas, incluyendo soluciones de monitorización de parámetros relevantes en procesos térmicos tales como la temperatura.
- Niveles 2 y 3: Si bien se han considerado en paralelo a las de Gestión Energética, las técnicas asociadas a la optimización de procesos de eficiencia térmica comienzan a integrarse en estos niveles en el cuadro general organizativo de las técnicas de Gestión energética integral, con lo que se desarrollan funciones similares a las de ésta en materia de eficiencia térmica.

### 3. Auto generación

Esta técnica hace referencia a la posibilidad de que una empresa utilice pequeños sistemas inteligentes de generación eléctrica y térmica, mediante la incorporación o no de fuentes de energía renovables, con la intención de reemplazar sistemas centralizados por sistemas distribuidos, la cual es una tendencia en auge y que permite tener un mayor control de cada una de los consumos de una determinada planta productiva. Esto facilita la obtención de datos y su posterior análisis y comparación.

Esta técnica seleccionada es una combinación de varias de las que se han propuesto en el apartado anterior, como Generación distribuida y microrredes y todas las relacionadas con fuentes de energías renovables (Fotovoltaica y mini-eólica).

Esta técnica se ha desglosado en los cuatro niveles definidos al inicio de este apartado, de manera que se puedan identificar y diferenciar soluciones más básicas con soluciones de I+D.

- El nivel 0 corresponde con la **realización de un estudio de viabilidad de la instalación y dimensionado de la misma**, de manera que el usuario pueda determinar la posibilidad o no de instalar en algún punto de la instalación un sistema de generación alternativa conociendo el impacto que esto tendría a nivel de consumo, y en conclusión, a nivel económico. De la misma manera, este estudio informaría de que sistema es el más apropiado en cada caso (Fotovoltaica, eólica, etc) y el dimensionado total de la instalación.



- El nivel 1 corresponde con la **instalación en la planta productiva de un sistema de generación de energía alternativa (EERR o no) con vertido a la red o no**. En este nivel el usuario ya conoce cuales son las posibilidades que tiene en su planta productiva y dónde puede instalar un sistema de generación para poder sacar el mayor rendimiento posible.
- El nivel 2 corresponde a la **instalación de un sistema de monitorización y control inteligente de los sistemas de generación de energía instalados**. De manera que el usuario sea capaz de ver en tiempo real el funcionamiento del sistema instalado, así como poder actuar sobre el mismo.
- El nivel 3 corresponde a la **instalación de un software de optimización del balance energético en el punto de conexión a red. Integración de modelos de predicción**. Este software será capaz de determinar cuál es la fuente de energía más apropiada en cada momento de todas las disponibles permitiendo así un balance energético favorable. Esto será posible mediante el control de diferentes parámetros que influyen de manera directa en el rendimiento de cada una de las fuentes de energía disponibles. De la misma manera, este software será capaz de predecir cuál va a ser la incidencia de cada una de las fuentes disponibles en el consumo total, en base a unas condiciones predeterminadas.

#### 4. Almacenamiento energético

Los sistemas de almacenamiento energético son una herramienta indispensable para aquellas empresas con consumos energéticos elevados, con procedimientos de producción poco flexibles y con interés en reducir los costes de estos suministros.

Los sistemas de almacenamiento ofrecen las siguientes ventajas a las empresas:

- Reducen los desacoples que pueden existir entre la generación y la demanda cuando la generación proviene de fuentes de origen renovable no gestionable (principalmente solar térmica o fotovoltaica y eólica).
- Permiten modificar el perfil de consumo que miden los contadores oficiales de tarificación para conseguir un ahorro económico desplazando consumos desde las horas donde el precio de la energía es más cara hasta las horas donde el precio de la energía es más barata.
- En el caso de almacenamiento eléctrico intensivo en potencia, ofrecen el servicio de protección de los equipos sensibles ante perturbaciones bruscas en la red eléctrica.
- Finalmente, permiten mantener el funcionamiento normal de la empresa ante fallos o cortes en la red de suministro principal.

A continuación se pasa a describir con más detalle cada uno de los niveles de implantación incluidos en el mapa de tecnologías:

- Nivel 0: En este primer nivel los trabajos se centran en la recopilación y análisis de la información asociada a la instalación tanto relacionada con la demanda total de energía demandada a la red de suministro principal como la propia generación. Los resultados del análisis servirán para identificar necesidades y dimensionar la instalación. Los resultados obtenidos servirán para concretar las bases de los desarrollos del resto de niveles.
- Nivel 1: Instalación de la infraestructura asociada a los sistemas de almacenamiento identificados en el diseño resultado del nivel 0: inversor/cargador, sistemas de almacenamiento e infraestructura asociada en el caso que se requiera.
- Nivel 2: Integración de herramientas que permitan realizar una mejor gestión y rendimiento de los equipos como es el caso de la integración de sistemas BMS y el control avanzado de las tecnologías de almacenamiento. Del mismo modo, se incluye en este nivel la monitorización de las variables eléctricas de los sistemas de almacenamiento y de la red donde se encuentren instalados dichos equipos.
- Nivel 3: En el último nivel se incluye la instalación de un software de gestión avanzada de los recursos que permita el envío de consignas para que las diferentes tecnologías de almacenamiento trabajen conjuntamente de la forma más óptima posible.

## **5. Mercado eléctrico**

La utilización de tarifas variables a lo largo del tiempo puede resultar una ventaja competitiva para la empresa siempre que sea capaz de modelar su consumo para demandar la máxima energía posible en las horas donde la energía es más barata reduciendo los consumos en las horas más caras. En función de la capacidad que disponga la empresa para gestionar sus consumos, se pueden contratar distintos tipos de tarifas con diferentes periodos tarifarios siendo la compra directa de energía en el mercado eléctrico la opción más flexible pero también la más compleja de gestionar debido a la variabilidad de este mercado.

- Nivel 0: La primera fase se centra en el análisis de los históricos de consumo y de la factura eléctrica para identificar ahorros potenciales a partir de un cambio de la tarifa eléctrica o una modificación del término de potencia contratada.
- Nivel 1: Se ponen en marcha los resultados de la primera fase, por lo tanto, se realizarán las gestiones necesarias para la contratación de la nueva tarifa



eléctrica y/o el cambio de la potencia contratada. En algunas situaciones, puede ocurrir que el cambio de potencia contratada requiera la realización de un proyecto de instalación autorizado y/o adaptar la instalación según normativa. En el caso que la tarifa seleccionada sea la compra/venta directa de energía en el mercado eléctrico, será necesario darse de alta como agente de mercado que acredite su capacidad de comprar en este mercado.

- Nivel 2: En esta fase se implementan una serie de herramientas que, a través de la monitorización de los consumos y de la generación de energía eléctrica, ayuden a la gestión de sus recursos para poder tomar acciones correctoras que permita tener unos ahorros mayores.  
En el caso que se compre la energía directamente en el mercado, se debe instalar un SW de mercado que le permita intercambiar información con el mercado (OMIE).
- Nivel 3: En el último nivel se incluye la utilización de sistemas avanzados que permitan la automatización de la gestión de la demanda en la línea de producción teniendo en cuenta las variaciones de precio incluidas en la tarifa eléctrica. Del mismo modo, se introducen herramientas para la optimización de la compra/venta de energía en el mercado eléctrico teniendo en cuenta modelos de predicción de la demanda, de la generación y del precio del mercado.

## 6. Empresa colaborativa

La filosofía de la industria 4.0 se centra en la interconexión y en la utilización de la información de una manera eficaz. De esta forma, se crea una nueva línea de trabajo a través de la cual se buscan sinergias entre distintas empresas para que al trabajar de forma colaborativa se consigan mejores resultados que los que se obtendrían trabajando de manera individual.

Desde un punto de vista energético, los niveles que se plantean son los siguientes:

- Nivel 0: Identificación de empresas con intereses comunes y estudio de posibles soluciones colaborativas. En algunas ocasiones, la implantación de una solución de empresa colaborativa dependerá en gran medida de la distancia física que las separa.
- Nivel 1: Instalación de sistemas de medida de los sistemas energéticos compartidos con el fin de poder realizar un reparto equitativo de los gastos e ingresos de las instalaciones compartidas. Del mismo modo, se deberá centralizar la información en una única plataforma. Dicha plataforma podrá ser una nueva plataforma o la integración de plataformas ya existentes.

- Nivel 2: Una vez se dispone de la información centralizada, el siguiente paso consiste en la implantación de herramientas de ayuda a la toma de decisiones (cuadro de mando) con indicadores (KPIs) energéticos para una mejor gestión de los recursos energéticos
- Nivel 3: Finalmente, para una mejor gestión y uso de la información, la utilización de herramientas Big Data y software de optimización a través de los cuales se ejecuten acciones sobre los recursos controlables.

## 4. Mapa general de técnicas de industria 4.0 para fabricación y eficiencia energética

A continuación, se muestran ambos mapas de eficiencia productiva y energética en la evaluación de las técnicas de digitalización 4.0:

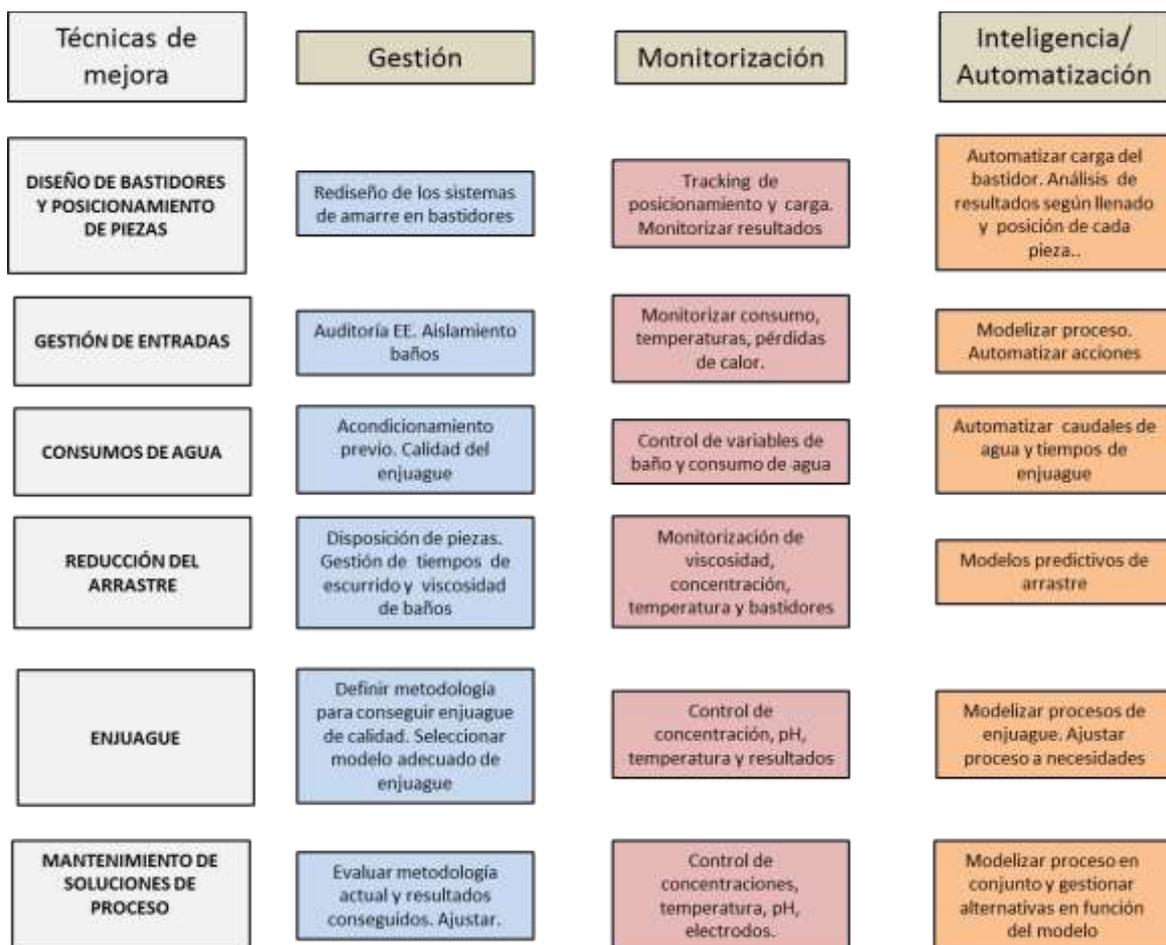


Figura 17. Mapa tecnologías digitales en proceso tratamiento superficies. AIDIMME



Figura 18. Mapa técnicas eficiencia según su grado de implantación digital. ITE

## 5. Conclusiones

Para la redacción de este documento se ha realizado una búsqueda de referencias con el objetivo de definir una serie de técnicas y tecnologías en cuanto a eficiencia energética y productiva en el sector industrial en general, y en el sector metalmeccánico y el subsector del galvanizado en particular, que permitan predecir la adaptación de las empresas a la industria 4.0 y les proponga una hoja de ruta a seguir.

Para ello, se han generado 2 mapas con la selección de las más relevantes desglosadas en diferentes niveles de desarrollo digital, que servirá de punto de partida para el desarrollo de la aplicación.

## 6. Bibliografía

- CTL, 2008. Estudio de evaluación y prospectivo de las tecnologías limpias en la Comunidad Valenciana. Valencia
- FEMEVAL, AIMME, 2008. Estudio tecnológico del sector del metal de la Comunitat Valenciana. Valencia
- FENERCOM, 2007. Guía básica de la generación distribuida.
- C Martínez-Rodríguez; JA Ferrer-Tevar; MR Heras-Celemín, 2013. Tendencias de investigación y desarrollo para eficiencia y gestión energética aplicados a la industria y agricultura
- INE, 2017. Nota de prensa, encuesta de Consumos Energéticos 2015. Datos definitivos
- JD Velosa García, LM Sánchez Ayala. Rev. esc.adm.neg. No. 72, Bogotá. Análisis de la capacidad tecnológica en Pymes metalmecánicas: una metodología de evaluación.
- FUNDES. Guía de buenas prácticas para el sector galvanotécnico. Colombia.
- Ministerio de Industria, Comercio y Turismo. Manual Media. Minimización Económica del Impacto Ambiental en la Industria. Euroenviron Eureka. 1993.
- Institut Cerdà. Manual de Minimización de Residuos y Emisiones Industriales. 1992.
- Gobierno de Aragón. Departamento de Agricultura y Medio Ambiente. Manual de Minimización de Residuos y Emisiones Industriales para las Industrias Transformadoras de los Metales del Sector Metal.
- George C. Cushnie, Jr. Electroplating Wastewater Pollution Control Technology. Noyes Publications. 1985.
- Robert Noyes. Pollution Prevention Technology Handbook. Noyes Publications. 1993.
- Thomas E. Higgins. Pollution Prevention Handbook. Lewis Publishers. 1995.
- Ludwig Hartinger. Handbook of Effluent Treatment and Recycling for the Metal Finishing Industry. Finishing Publications Ltd. 1994.
- Environmental Protection Agency (EPA). Manual de Minimización de la Industria Metal – Mecánica.



- Cushnie, George C., Jr. Pollution Prevention and Control Technologies for Plating Operators. National Center for Manufacturing Sciences. 1994.
- IHOBE, S.A. Sociedad Pública de Gestión Ambiental. Libro Blanco para la Minimización de Residuos y Emisiones. Gobierno Vasco. Departamento de Ordenación del Territorio, Vivienda y Medio Ambiente. 1997.
- Robert Weiner. Épuration des eaux résiduaires dans la transformation et la galvanisation des métaux. Editions Eyrolles. 1975.
- Jean – Noel Breuil. Traitement de surface: dépollution à la source. Ministère de L'Environnement. 1985.
- Jean – Marc Muiras. Bernard Sutter. Jean Claude Guillaus. Traitements de surface: techniques de réduction de déchets. Centre Technique des industries mécaniques. 1995.
- Dopee. Environnement et Electricité. Les techniques propres dans l'industrie. Electricité de France. 1994.
- D. Satas. Coating Technology Handbook. Marcel Dekker. Inc. 1991.
- David Hemcley. Minimizing chemical and water waste in the metal finishing industry. ETBPD.
- Environmental Protection Agency (EPA) International Minimization Approaches and Policies to Metal Plating. 1996.
- Integrated Pollution Prevention and Control. Best Available Techniques for the Surface Treatment of Metals and Plastics. European Commission. 2005.