

# GUÍA PRÁCTICA DE TECNOLOGÍAS PARA EL PROCESO DE REMANUFACTURA



Fondo Europeo de  
Desarrollo Regional (FEDER)  
"Una manera de hacer Europa"  
Europar Batasuna  
Unión Europea

Eskualde Garapenerako  
Europar Funtas (EGEF)  
"Europa egiteko modu bat"

  
**Mondragon  
Unibertsitatea**  
Goi Eskola  
Politeknikoa  
Escuela Politécnica  
Superior

ihobe

Herri-baltzua  
Sociedad Pública del  
  
**EUSKO JAURLARITZA  
GOBIERNO VASCO**  
INGURUMEN, LURRALDE PLANGINTZA  
ETA ETXEBIZITZA SAILA  
DEPARTAMENTO DE MEDIO AMBIENTE,  
PLANIFICACIÓN TERRITORIAL Y VIVIENDA

© Ihobe S.A., Junio 2018

**Edita: Ihobe, Sociedad Pública de Gestión Ambiental  
Departamento de Medio Ambiente, Planificación Territorial y Vivienda  
Gobierno Vasco**

**C/Alameda de Urquijo, 36 6º Planta  
48011 Bilbao  
[info@ihobe.eus](mailto:info@ihobe.eus)  
[www.ingurumena.eus](http://www.ingurumena.eus)  
[www.ihobe.eus](http://www.ihobe.eus)**

**Contenido: Este documento ha sido elaborado con la colaboración de la Escuela  
Politécnica Superior de Mondragon Unibertsitatea**

## Índice

|       |   |    |
|-------|---|----|
| 1     | Introducción .....  | 5  |
| 2     | Bases técnicas.....   | 8  |
| 2.1   | Tecnologías de limpieza .....                               | 8  |
| 2.1.1 | Soluciones de limpieza.....                                 | 8  |
| 2.1.1 | Limpieza manual .....                                       | 9  |
| 2.1.2 | Limpieza por CO2.....                                       | 9  |
| 2.1.3 | Limpieza por ultrasonidos .....                             | 15 |
| 2.1.4 | Limpieza por láser.....                                     | 18 |
| 2.1.5 | Limpieza térmica .....                                      | 20 |
| 2.1.6 | Limpieza con agua a alta presión.....                       | 23 |
| 2.1.7 | Limpieza abrasiva .....                                     | 25 |
| 2.2   | Tecnologías de desmontaje.....                              | 29 |
| 2.2.1 | Desmontaje no destructivo.....                              | 29 |
| 2.2.2 | Desmontaje semi-destructivo .....                           | 30 |
| 2.2.3 | Desmontaje destructivo.....                                 | 30 |
| 2.3   | Tecnologías de inspección.....                              | 30 |
| 2.3.1 | Superficial/Volumétrica.....                                | 30 |
| 2.3.1 | Dimensional.....  | 38 |
| 2.3.1 | Prueba eléctrica.....                                       | 41 |
| 2.4   | Tecnologías de reacondicionamiento .....                    | 43 |
| 2.5   | Tecnologías de ensamblaje.....                              | 50 |
| 2.6   | Tecnologías para test.....                                  | 50 |
| 3     | Metodología para la selección de tecnologías .....          | 50 |
| 3.1   | Tecnologías de limpieza .....                               | 50 |
| 3.2   | Tecnologías de desmontaje .....                             | 55 |
| 3.3   | Tecnologías de inspección .....                             | 56 |
| 3.4   | Tecnologías de reacondicionamiento .....                    | 59 |
| 4     | Aplicaciones.....   | 60 |
| 4.1   | Rodamientos de gran tamaño (Kaydon, 2017).....              | 61 |
| 4.2   | Motor agrícola de combustión interna (CNH Reman, 2017)..... | 65 |
| 5     | Bibliografía y referencias.....                             | 73 |

## Introducción

El proceso de remanufactura, como ya se ha mencionado anteriormente, consiste en recoger un producto usado (al final de su vida útil) y modificarlo para que obtener un producto que tenga las misma o mejores características que uno nuevo. En la Figura 1, se puede observar el esquema simplificado del proceso de remanufactura y el punto del ciclo de vida del producto donde interviene la remanufactura. El proceso, se puede resumir en 7 fases: Recogida, desmontaje, limpieza, inspección, reacondicionamiento, ensamblaje y test. Pese a que la recogida de los componentes sea una fase del proceso de remanufactura. En este trabajo, no se va analizar dicho proceso, ya que no es un proceso aplicable al producto como las otras 6 restantes.

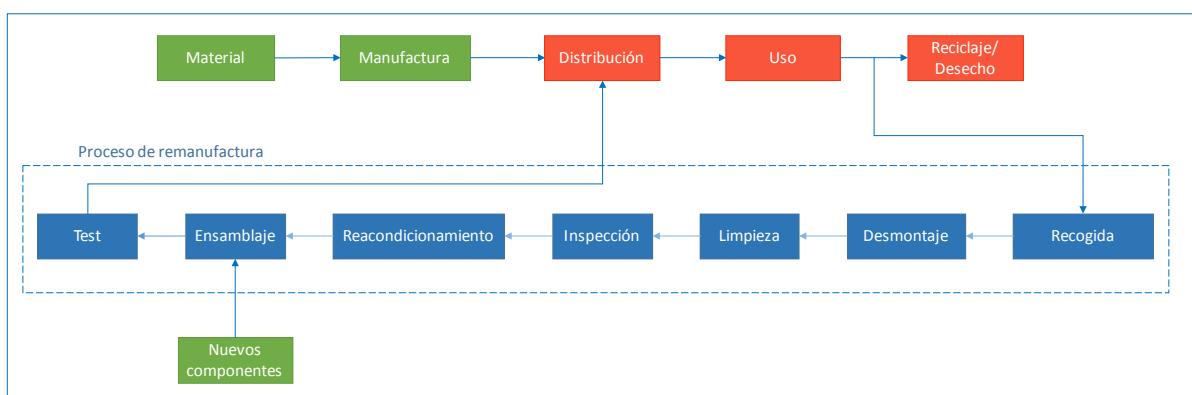


Figura 1 Ciclo de vida de un producto manufaturado (azul) y un producto remanufacturado (verde) (A. Treat, 2012).

- **Recogida:** La primera fase de todos los procesos de remanufactura. Como bien dice su nombre, consiste en recoger los componentes rotos y llevarlos a la planta de remanufactura.
- **Desmontaje:** En esta fase, se desmonta el producto y se separan los componentes que se van a remanufacturar de los demás componentes. Hay que tener cuidado en no dañar los componentes la hora de desmontarlos.
- **Limpieza:** Los componentes se limpian para eliminar toda la suciedad que puedan tener (grasa, óxido, pintura, etc.).
- **Inspección:** Se inspeccionan todo los componentes minuciosamente, y se descartan aquellos que estén defectuosos.
- **Reacondicionamiento:** Se realizan diferentes operaciones al componente. Bien para acondicionarlo a los nuevos componentes, bien para corregir los pequeños defectos que pueda tener.
- **Ensamblaje:** Se montan todo los componentes del producto. Los nuevos componentes y los remanufacturados.
- **Test:** Se le realiza un test al producto para verificar su calidad antes de volverlo a introducir en el mercado.

Aunque en la Figura 1 se puede ver el esquema simplificado del proceso de remanufactura; hay que destacar, que el proceso de remanufactura no es un proceso sistemático, no hay un orden que defina el proceso. Cada producto es un mundo, por lo que es imposible diseñar un esquema que sea válido

para todos los productos. No todo los productos tienen ni las mismas fases ni es mismo orden. Por ello, no existe un orden que defina el proceso de remanufactura; es verdad, que siempre aparecen las mismas fases, pero se ordenan de diferente manera dependiendo del producto (Figura 2).

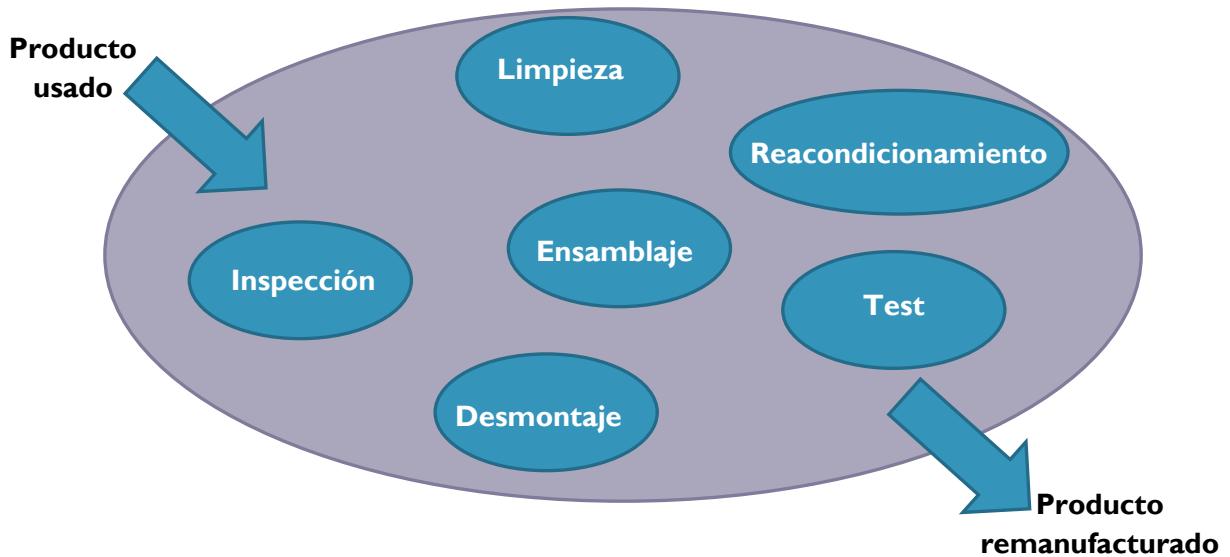


Figura 2.- Proceso general de remanufactura (E. Sundin, 2004)

Cada producto tiene su propio proceso. Algunos producto, necesitan una limpieza antes de desmontarlos; otros, por ejemplo, se pueden desmontar e inspeccionar sin necesidad de una limpieza previa. Es decir, el producto o el estado del producto determinan el proceso de remanufactura y las tecnologías necesarias para cada fase. Aun así, en la Figura 3 se puede observar el esquema más común del proceso de remanufactura. En dicho proceso, la limpieza cobra gran protagonismo, siendo de la fase que más se repite junto a la de inspección.

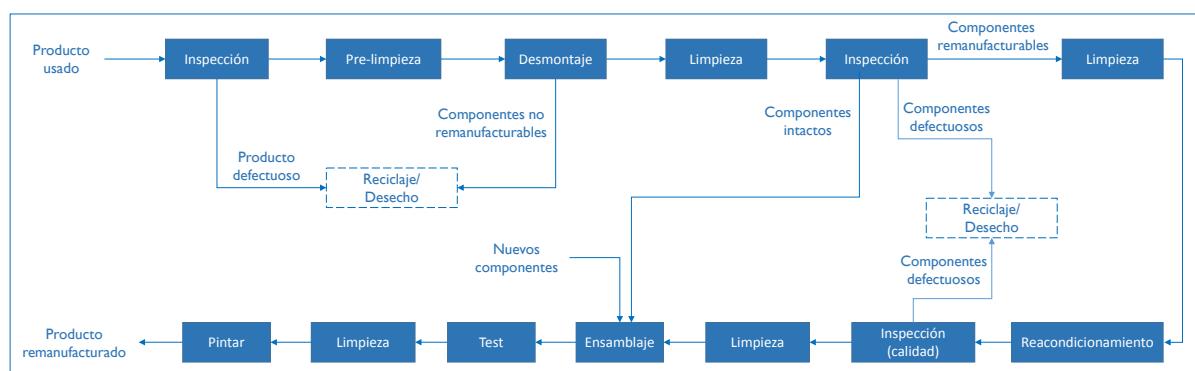


Figura 3.- Esquema más común en los procesos de remanufactura (W. Liu, 2013)

La primera fase del proceso, consiste en inspeccionar el producto. Esto, permite identificar y descartar aquellos productos que estén en mal estado antes de realizar otras operaciones en vano (como la limpieza) y mal gastar dinero; es decir, se realiza un diagnóstico inicial para valorar si merece la pena remanufacturarlo. Luego, dependiendo de la suciedad del producto, se suele realizar una limpieza rápida (pre-limpieza); lo que permite desmontar el producto más fácilmente e inspeccionar aquellas zonas que antes tapaba la suciedad.

En aquellos casos, donde la suciedad no permita inspeccionar el producto; la pre-limpieza, será la primera fase de la remanufactura. La siguiente fase consiste en desmontar el productor. Los componentes que se puedan remanufacturar, se separan de aquellos que no tiene valor o estén muy deteriorados. Después, viene la fase de limpieza.

En esta fase, se elimina toda la suciedad que tengan los componentes. Se suele utilizar más de una tecnología de limpieza, ya que no suele ser posible eliminar diferentes tipos de suciedades con una sola tecnología. A continuación, se inspeccionan los componentes con el fin de descartar los componentes defectuosos. Para ello, dependiendo del componente, se realizan diferentes tipos de inspecciones: inspección superficial, volumétrica, dimensional y prueba eléctrica. Luego, se volverían a limpiar los componentes. El hecho de realizar esta fase, depende del tipo de inspección que se le haya realizado antes, ya que si no se ha usado ninguna inspección que ensucie el componente, no es necesario realizar dicho proceso. Después, viene la fase de reacondicionamiento. Es una fase que depende mucho del componente, puesto que existen un montón de operaciones posibles. Eso sí, las operaciones suelen tener gran similitud con los procesos realizados durante la manufactura. Una vez finalizado el reacondicionamiento, se hace un control de calidad (inspección) para verificar que se hayan realizado correctamente el proceso de reacondicionamiento.

Es importante aclarar, que aunque esta fase y las siguientes estén dentro del proceso de remanufactura, son procesos que aparecen en un proceso de manufactura, por lo que no suelen tener ningún misterio para la empresa. En la siguiente fase, se vuelven a limpiar los componentes, siempre y cuando sea necesario. Al igual que en la anterior fase de limpieza, esto dependerá de las operaciones que se hayan realizado en la fase de reacondicionamiento e inspección. A continuación, los componentes remanufacturados se ensamblan con los nuevos y se realiza un test que compruebe el correcto funcionamiento del producto remanufacturado. Finalmente, se vuelve a limpiar el producto, se pinta y se empaqueta (la fase limpieza y la pintura se realizará siempre que el producto lo necesite).

Para cada fase existen diferentes tecnologías. La selección de cada tecnología depende en el tipo de producto. Por ello, en el siguiente apartado, se van a analizar algunas de las tecnologías que se pueden utilizar en las diferentes fases del proceso de remanufactura. Especialmente, las tecnologías que se pueden utilizar para las fases de limpieza e inspección; debido a la necesidad que hay en las empresas (con potencial de remanufactura) de implantar nuevas tecnologías para estas fases (Tabla I).

**Tabla I.- Disponibilidad de tecnologías para las diferentes fases del proceso de remanufactura en las empresas del País Vasco**

| Fuentes<br>Procesos tecnológicos | Disponible en las plantas de los candidatos seleccionados | Fácilmente adaptable desde las operaciones de servicio | Necesidad de desarrollo<br>Dependiendo de las necesidades |
|----------------------------------|---|--|---|
| Diagnóstico inicial (inspección) |   |  |   |
| Desmontaje                       |   |  |   |
| Limpieza                         |   |  |   |
| Inspección                       |   |  |   |
| Reacondicionamiento              |   |  |   |
| Ensamblaje                       |   |  |   |



En la Tabla 1, se puede ver que las empresas tienen la suficiente capacidad tecnológica como para realizar las fases de test, ensamblaje y reacondicionamiento debido a que son idénticas a las del proceso de manufactura. Es verdad, que en algunos casos, hay que implantar alguna tecnología que no se utiliza en el proceso de manufactura para la fase de reacondicionamiento.

En el otro lado, está la fase de limpieza, que necesita ser completamente desarrollada dependiendo de las necesidades de cada empresa. Por esta razón, esta fase es la que más a fondo se va analizar en los siguientes apartados.

En un punto intermedio, están las fases de inspección y desmontaje. Las empresas no están adaptadas para estos procesos, pero son más fáciles de implementar que el proceso de limpieza. Sobre todo la de desmontaje, ya que, tecnológicamente hablando, no tiene una gran complejidad. Las empresas que se dedican a montar los productos, saben perfectamente el procedimiento que hay que seguir para desmontarlos. Las inspecciones, sin embargo, son unos procesos desconocidos (quitando los controles de calidad); por ello, tienen mayor dificultad a la hora de implantarlos en las empresas.

## Bases técnicas

El objetivo de este apartado es clasificar las posibles tecnologías que se puedan utilizar durante el proceso de remanufactura con el fin de ayudar en la selección de la tecnología más adecuada para cada fase y producto. La clasificación de las tecnologías, se ha dividido en 5 grupos: tecnologías de limpieza, desmontaje, inspección, ensamblaje y test.

### Tecnologías de limpieza

La limpieza es la fase más importante del proceso de remanufactura. La fase de limpieza determina la calidad del producto final, ya que la eficiencia de las siguientes fases está directamente relacionada con la calidad de la limpieza. Un objeto sucio no se puede ni inspeccionar, ni montar, ni pintar correctamente (M. Li, 2015). Por ello, es importante seleccionar las tecnologías más idóneas para cada producto.

Esta fase, suele estar compuesta por dos o más tecnologías, ya que difícilmente se consigue eliminar toda la suciedad con un solo proceso de limpieza. Esto no quiere decir que no haya productos que solo necesiten una única tecnología.

En este apartado, se hará un pequeño resumen de las tecnologías de limpieza aplicables al proceso de remanufactura.

#### 1.1.1 Soluciones de limpieza

Las soluciones de limpieza, como bien dice su nombre, son soluciones que se utilizan para eliminar la suciedad. En algunos casos, a la tecnología de limpieza, se le pueden añadir algún tipo de solución de limpieza con el fin de mejorar la eficiencia del proceso. Las soluciones, mayormente, se dividen en tres grupos: Base acuosa, semi-acuosa y disolventes. La selección de uno u otro dependerá del material al limpiar y del contaminante que se quiera eliminar.

### 1.1.1.1 Base acuosa

La necesidad de unos medios de limpieza más respetuosos con el medio ambiente que los disolventes, ha hecho que las soluciones de base acuosa tenga un gran protagonismo en el sector de la limpieza industrial. Dentro de las soluciones de base acuosa se diferencian tres tipos de soluciones, dependiendo de la acidez de la disolución (pH): alcalino, ácido y neutro.

Las soluciones acuosas con un valor de pH mayor que 7, se denominan soluciones acuosas alcalinas. Se usan para eliminar contaminantes orgánicos como grasa, aceite, cera, etc. Cuanto más alcalino sea la disolución, mayor capacidad de limpieza tendrá el producto.

Las soluciones acidas, son aquellas soluciones con un valor de pH menor que 6. Se utilizan para eliminar el óxido de las superficies.

Las soluciones acuosas con pH neutro ( $5 < \text{pH} < 8$ ). Al no tener la misma capacidad de desengrasar ni de eliminar el óxido de las soluciones alcalinas o acidas. Se utilizan para mejorar los procesos de limpieza mecánicas, ya que estos procesos no dependen tanto de una reacción química. Ejemplo de ello puede ser la limpieza por ultrasonidos (Dürr, 2016).

### 1.1.1.2 Disolventes

Los disolventes han sido las soluciones de limpieza más usadas en la industria debido a su bajo coste y alta eficiencia. Pero, su uso se está reduciendo por el hecho de que sea un producto bastante perjudicial para la salud y el medio ambiente (PPRC, 2016).

### 1.1.1.3 Semi-acuosa

La solución de limpieza semi-acuosa consiste en una disolución que está compuesta por un disolvente y agua. Por lo que durante el proceso de limpieza hay menos emisiones de compuesto orgánicos volátiles. Siendo una limpieza más respetuosa con el medio ambiente que los disolventes (Cleantool, 2016).

## 1.1.1 Limpieza manual

La limpieza manual es el método más simple y virtualmente no requiere de equipamiento técnico. Sin embargo, la exposición de los trabajadores a agentes químicos es mucho mayor que con limpieza automatizada. Las piezas sucias se limpian utilizando paños o esponjas impregnados con un agente de limpieza, siempre teniendo en cuenta las medidas de protección personal del operario (guantes de goma, protección ocular y delantal). Generalmente el agente de limpieza se deja actuar unos minutos (2 o 3 minutos suele ser suficiente) y luego se enjuaga con agua (Cleantool, 2016).

## 1.1.2 Limpieza por CO<sub>2</sub>

Esta tecnología de limpieza consiste en utilizar el dióxido de carbono en sus diferentes fases para eliminar la suciedad de un amplio abanico de materiales. Para ello no se produce CO<sub>2</sub>, gas que es perjudicial para el medio ambiente, sino que se utiliza el CO<sub>2</sub> que haya sido creado en otro proceso. Consiguiendo darle una utilidad a este gas, que de la otra forma, hubiera sido expulsado a la atmósfera. Mediante esta tecnología, se obtiene una limpieza no destructiva y libre de residuos.

Además, se eliminan los problemas medioambientales que puede acarrear el uso de otros métodos de limpieza como pueden ser los clorofluorocarbonos (CFC) o los sistemas de limpieza a base de agua, ya que no es ni tóxico, ni inflamable, ni es perjudicial para la capa de ozono. Tampoco es una tecnología que ponga en peligro al operario, siendo el único riesgo el contacto directo de la piel del CO<sub>2</sub> a alta presión. A continuación se exponen los detalles de los diferentes procesos de limpieza

por CO<sub>2</sub> que han sido adaptados de *Handbook for Critical Cleaning: Cleaning Agents and Systems* (B. Kanegsberg, 2011).

### 1.1.2.1 CO<sub>2</sub> en polvo

Consisten en utilizar pequeñas partículas de hielo seco para golpear y limpiar la superficie sucia mediante interacciones físicas o solventes. No ocurre ninguna reacción química, ni hay un proceso abrasivo a la hora de eliminar la suciedad.

#### Características

Es una tecnología versátil, ya que elimina partículas de una gran variedad de tamaños. Eliminando tanto partículas que se aprecian a simple vista como las partículas de 0,03 µm. También, es capaz de eliminar pequeñas cantidades de residuos orgánicos con la misma eficiencia que los disolventes. Además, la suciedad producida por los hidrocarburos puede ser eliminado utilizando esta tecnología.

#### Limitaciones

La limpieza mediante CO<sub>2</sub> en polvo se puede usar con una gran cantidad de materiales, ya que en la mayoría de los casos, la superficie no sufre ningún cambio. Por ello, las limitaciones del material estarán relacionadas con el choque térmico y la resistencia mecánica de este.

Cabe destacar, que limpiar sistemas microelectromecánicos (MEMS) mediante esta tecnología es complicado, debido a que estos componentes contienen KBr y LiF.

Asimismo, hay que destacar, que esta tecnología no es la más idónea para limpiar superficies con grandes cantidades de residuos orgánicos.

#### Equipamiento

Como se puede ver en la Figura 4 el equipamiento necesario para utilizar esta tecnología es bastante simple. Está compuesta por un sistema de pulverización de alta presión, una manguera, una válvula, una fuente de CO<sub>2</sub> (una bombona por ejemplo) y una boquilla (Nozzle).



Figura 4.- Equipamiento CO<sub>2</sub> en polvo

#### Aplicaciones

La limpieza con CO<sub>2</sub> en polvo se puede usar para retirar partículas y residuos orgánicos en las siguientes superficies: Metálicos, cerámicos, polímeros, vidrio, elementos ópticos y obleas.

Se utiliza para limpiar componentes de discos duros, sistemas ópticos de rayos x o circuitos impresos como se puede observar en la Figura 5.

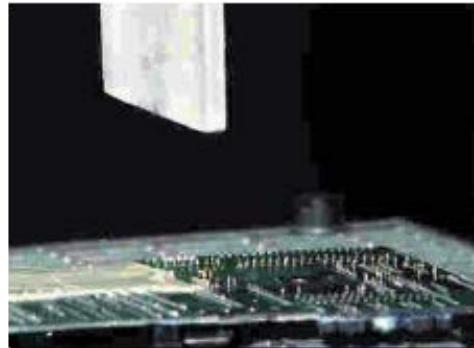


Figura 5.- Limpieza de circuitos impresos (CO<sub>2</sub> en polvo)

#### 1.1.2.2 CO<sub>2</sub> pellet

La limpieza mediante pellet de CO<sub>2</sub> consiste en lanzar pellet macroscópicos de hielo seco a gran presión para limpiar la superficie. El impacto a gran velocidad y las fuerza termomecánicas son la base de la limpieza. Siendo una especie de granallado pero sin arena.

#### Características

Se usa para eliminar recubrimientos no deseados como pintura, porquería y residuos de fundición y de molde. Con la ventaja de que los pellet se subliman a estado de gas, quedando solo el residuo eliminado del objeto a limpiar.

#### Limitaciones

El choque térmico es la mayor limitación de esta tecnología; por ello, hay que tener cuidado a la hora de limpiar objetos que estén a gran temperatura.

No suele haber problemas de abrasión en las aplicaciones industriales, ya que la dureza de los pellets no es muy grande. Sin embargo, hay que prestar especial atención a los materiales blandos y frágiles, porque pueden ser dañados.

#### Equipamiento

El equipamiento del CO<sub>2</sub> pellet es más complejo que el del CO<sub>2</sub> en polvo. Dado que, a la fuente de CO<sub>2</sub>, a la manguera y a la boquilla, hay que sumarle un compresor de aire y una cámara de mezclado (Figura 6).



Figura 6.- Equipamiento CO<sub>2</sub> pellet

### Aplicaciones

Como se ha mencionado anteriormente, esta tecnología es muy útil para eliminar recubrimientos no deseados, como la pintura, en superficies que puedan tener problemas de abrasión. Puesto que la dureza de los pellet de CO<sub>2</sub> es bastante menor que de otros abrasivos (arena, vidrio...).

Se usa en el sector aeronáutico para el decapado de pintura. También, se usa para limpiar hornos, tolvas, tanques o moldes de forja y fundición.

#### 1.1.2.3 CO<sub>2</sub> supercrítico

En esta tecnología se utiliza el CO<sub>2</sub> en estado supercrítico (utilizando presiones y temperaturas superiores al punto crítico) para eliminar la suciedad. Siendo un fluido de baja densidad, buena transmisión, permeabilidad y alta difusividad. El CO<sub>2</sub>, está en un estado intermedio entre líquido y gas. De este modo, se consigue un fluido que tenga la alta solubilidad de los líquidos y una difusividad similar al del gas (W. Liu, 2015).

Esta tecnología se está usando en lugar de la tradicional limpieza térmica, a la hora de remanufacturar materiales con bajo punto de fusión (M. Li, 2015). Es muy apropiado para eliminar grasa e hidrocarburos.

### Características

Los problemas de bajo punto de fusión del material, no es un inconveniente con esta tecnología. Esto, permite limpiar mayor variedad de materiales que mediante la limpieza térmica. Además, las altas temperaturas utilizadas en la limpieza térmica pueden reducir drásticamente la dureza del material, cosa que no ocurre con la limpieza supercrítica. Por ello, si la pieza al limpiar tiene un bajo punto de fusión o si la reducción de la dureza puede ser un problema, esta tecnología es muy recomendada (M. Li, 2015).

La mayoría de los compuestos orgánicos son eliminados utilizando el CO<sub>2</sub> en estado supercrítico. Creando fisuras en aquellos más resistentes, facilitando su eliminación en la siguiente tecnología de limpieza (W. Liu, 2015). Pero cabe destacar, que es una tecnología muy apropiada para eliminar compuestos orgánicos hidrofóbicos no polares. Como pueden ser los aceites y lubricantes, el aceite de silicona, los residuos de gasolina, los agentes plastificantes, la grasa, la cera, los compuestos de hidrocarburos, los perfluorocarburos o las huellas. También, elimina gran parte de los sedimentos carbonizados (W.-w. Liu, 2015).

### Limitaciones

Es difícil eliminar el óxido o las capas de compuestos inorgánicos. Aunque la mayor limitación de esta tecnología es su precio. El equipamiento al estar diseñado para soportar altas presión, suele ser bastante más caro que el de las tecnologías de limpieza que usan presión atmosférica (W.-w. Liu, 2015).

### Equipamiento

Es necesaria una máquina que esté diseñada para soportar presiones altas (Figura 7). Haciendo de ella una tecnología cara.



**Figura 7** Equipamiento CO<sub>2</sub> supercrítico.

## Aplicaciones

La aplicación principal del fluido supercrítico es la eliminación de aceite y grasa. Aunque no es capaz de eliminar por completo los sedimentos carbonizados, sí que los ablanda. Facilitando la limpieza de la siguiente tecnología. Ejemplo de ello, es la remanufactura de una válvula de un motor diésel (W.-w. Liu, 2015). Donde se usa una limpieza compuesta por  $\text{CO}_2$  supercrítico + agua a alta presión para eliminar los sedimentos de carbono con muy buenos resultados (Figura 8).



**Figura 8 Limpieza de una válvula de motor: pieza a remanufacturar (a), limpieza supercrítico (b), supercrítico + limpieza con agua a alta presión (c).**

Se usa en el sector automovilístico a la hora de remanufacturar motores, en el que cambiar las propiedades de la superficie (limpieza térmica) puede llegar a ser un problema de cara a la calidad del producto final.

### Resumen de la limpieza por $CO_2$

Tabla 2 Resumen de la limpieza por  $CO_2$ .

| Resumen de la limpieza por $CO_2$ |  |  |
|-----------------------------------|--|--|
| Método de limpieza                | Ventajas   | Desventajas  |
| $CO_2$ en polvo                   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• No hay ni abrasión ni reacción química en la superficie.</li> <li>• No suele dañar la superficie.</li> <li>• Elimina partículas de gran variedad de tamaño.</li> <li>• Equipamiento simple y barato.</li> <li>• Se puede usar con muchos materiales.</li> </ul>                   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• No es la más idónea para eliminar grandes cantidades de residuos orgánicos.</li> <li>• Es complicado limpiar MEMS.</li> <li>• Puede haber choque térmico.</li> </ul>                        |
| $CO_2$ pellet                     | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Limpieza abrasiva sin problemas de abrasión.</li> <li>• Sublimación de los pellets.</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Puede haber choque térmico.</li> <li>• Equipamiento más complejo que el de la limpieza por <math>CO_2</math> en polvo.</li> <li>• Cuidado con materiales muy blandos y frágiles.</li> </ul> |
| $CO_2$ supercrítico               | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Gran eficiencia eliminando grasa e hidrocarburos (La mejor de los tres).</li> <li>• Se eliminan la mayoría de los compuestos orgánicos.</li> <li>• No hay limitación del material por su punto de fusión.</li> <li>• No cambia las propiedades mecánicas del material.</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Equipamiento caro.</li> <li>• Es difícil eliminar óxido o compuestos inorgánicos.</li> </ul>  |

#### 1.1.3 Limpieza por ultrasonidos

La limpieza por ultrasonidos consiste en utilizar las ondas sonoras de alta frecuencia (20-400 kHz) para agitar la solución de limpieza. Las burbujas de cavitación, que han sido inducidas por la agitación, son las que eliminan los residuos (aceite, grasa, polvo, etc.) adheridos a la superficie. Es una tecnología que se adapta a objetos de una gran variedad de formas, dimensiones y materiales. Siendo capaz de limpiar agujeros ciegos, grietas y pequeños huecos (R. Lu, 2013). Normalmente, la solución de limpieza suele tener una base acuosa (D. S. Liebl, 1993).

El objetivo principal de esta tecnología es poder limpiar superficies que sean difíciles de acceder utilizando las tecnologías convencionales. Eliminando superficies que estén contaminados con aceite,

grasa, polvo, partículas o suciedad inorgánica. Es una tecnología aplicable a un gran abanico de materiales: metales, plásticos, vidrios, cerámicos o caucho (W. Liu, 2013). Además, no suele dañar la superficie a limpiar (P. Duan, 2014).

### Características

La limpieza por ultrasonidos es rápida y de bajo coste (P. Duan, 2014). A lo que hay que sumarle, que se pueden limpiar componentes sin necesidad de desmontarlos completamente. Bien porque sea complicado desmontarlos o bien porque no sea necesario (T.J. Mason, 2016), acelerando el proceso de remanufactura.

Con esta tecnología, además de conseguir objetos con un alto nivel de limpieza (P. Duan, 2014) se consigue una limpieza bastante homogénea en todo el objeto a limpiar. Siempre y cuando se eliminen las ondas estacionarias (T.J. Mason, 2016).

Es una tecnología que utiliza soluciones con base acuosa para el proceso de limpieza, soluciones mucho más respetuosas con el medio ambiente que los disolventes clorados o los hidrocarburos (T.J. Mason, 2016).

### Limitaciones

La limpieza por ultrasonidos puede causar erosión en el material. La erosión depende del material que se esté limpiando. La eficiencia de la limpieza está relacionada con el tiempo de limpieza, la forma de la pieza, temperatura y los aditivos químicos (D. S. Liebl, 1993). Seleccionar bien los parámetros de limpieza para cada contaminante es muy importante, no solo por el hecho de que determinara la eficiencia del proceso, sino porque una mala selección dañara la superficie de la pieza (W. Liu, 2013).

No es el proceso más adecuado para limpiar materiales con una textura blanda o que tenga una gran capacidad de absorción de ondas sonoras (P. Duan, 2014).

### Equipamiento

En la Figura 9 se puede ver tanto el equipamiento básico (a) como el un equipo de limpieza automatizado (b). El equipamiento básico está compuesto por:

- Tanque (Normalmente de acero inoxidable)
- Transductor
- Generador (Generalmente de 40 kHz)
- Solución de limpieza



Figura 9.- Equipamiento de la limpieza por ultrasonidos: Equipamiento básico (a) y equipo automatizado (b)

## Aplicaciones

La particular ventaja de la limpieza por ultrasonidos es la capacidad que este tiene de limpiar superficies que son difíciles de acceder. Por ello, una de las grandes aplicaciones es la limpieza de objetos con geometrías complejas o con muchos recovecos. También, el hecho de ser una limpieza rápida, hace que sea una opción interesante a la hora de buscar una gran productividad.

Es importante mencionar, que para componentes pequeños y delicados como las obleas de silicio, circuitos impresos o componentes de ordenador hay que optar por la limpieza denominado como “megasonic” (D. S. Liebl, 1993).

### Megasonic

La limpieza megasonic es igual que la limpieza de ultrasonidos pero utilizando ondas sonoras de mayor frecuencia (700-1000 kHz). Haciendo posible limpiar superficies que mediante la limpieza por ultrasonidos eran dañadas. La desventaja de esta tecnología, que solo permite limpiar la superficie que está mirando al transductor. Esto, ralentiza el proceso de limpieza (D. S. Liebl, 1993).

### *Resumen de la limpieza por ultrasonidos*

Tabla 3.- Resumen de la limpieza por ultrasonidos

| Resumen de la limpieza por ultrasonidos |  |  |
|---|--|--|
| Método de limpieza                      | Ventajas   | Desventajas  |
| <b>Limpieza por ultrasonidos</b>        | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Limpia superficies que son difíciles de acceder.</li> <li>• Elimina grasa, aceite, polvo, partículas y suciedad inorgánica.</li> <li>• Se puede aplicar a un gran abanico de materiales.</li> <li>• No suele dañar la superficie.</li> <li>• Rápida y de bajo coste.</li> <li>• Utiliza soluciones acuosas.</li> <li>• Se puede automatizar.</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Puede causar erosión.</li> <li>• La eficiencia está altamente determinada por los parámetros de limpieza.</li> <li>• Es complicado seleccionar los parámetros de limpieza (corrosión).</li> <li>• No aplicable a materiales con una textura blanda o que absorban gran número de ondas sonoras.</li> <li>• No se pueden limpiar componentes delicados (excepto con megasonic).</li> <li>• Es necesario tratar la solución que se haya utilizado.</li> </ul> |

#### 1.1.4 Limpieza por láser

La limpieza por láser consiste en utilizar un rayo láser de alta energía para irradiar la superficie. Mediante el rayo láser, se elimina la suciedad, óxido o pintura de la superficie (P. Duan, 2014). La radiación, limpia la superficie utilizando diferentes mecanismos. Estos mecanismos, se dividen en tres grandes grupos: proceso de evaporación, proceso de impacto y proceso de vibración (R. V. Fox, 2013).

## Características

Esta tecnología permite limpiar superficies que contengan contaminantes comunes como grasa, aceite u óxido. También, sirve para eliminar contaminantes radiactivos, descontaminar superficies expuestas a agentes de guerras químicas o incluso eliminar contaminantes como el arsénico o el mercurio de la superficie (R. V. Fox, 2013). Teniendo en cuenta, que para eliminar algunos contaminantes, varias rondas de limpieza son necesarias. En trabajos a gran escala, la limpieza por láser, se usa para el decapado de pintura (W. M. Steen, 2010).

Es una tecnología que no necesita ni partículas abrasivas (no hay contacto mecánico) ni solventes para funcionar. Por ello, es muy útil para limpiar componentes donde el impacto de las partículas abrasivas puede ser un problema (R. V. Fox, 2013). Además, permite ahorrar grandes cantidades de agua. La limpieza por láser, es una tecnología con una gran eficiencia de limpieza, rápida, precisa y fiable (P. Duan, 2014).

## Limitaciones

A día de hoy, la limpieza por láser es una tecnología que está en fase de desarrollo. Por ello, la única limitación de la tecnología es su alto coste (P. Duan, 2014).

## Equipamiento

El equipamiento de la limpieza por láser, puede ser tanto portable como fija (Figura 10). Donde el tamaño del equipamiento varía dependiendo de la potencia del láser. Mediante el equipamiento fijo, se puede automatizar la limpieza, lo que permite una limpieza de gran exactitud.



Figura 10 Equipamiento de la limpieza por láser: equipamiento portable (a) y equipamiento fijo (b)

## Aplicaciones

Al ser una tecnología cara y que permite limpiar superficies sensibles; hace, que a día de hoy, su mayor aplicación sea la conservación del patrimonio cultural (industria de la conservación y restauración). Donde el alto coste de la tecnología no es un impedimento a la hora de usarlo. Permitiendo limpiar esculturas de mármol o restaurar pinturas y manuscritos (W. M. Steen, 2010).

La limpieza por láser también se utiliza en la industria microelectrónica, ya que se busca una limpieza suave. Esto, permite lavar las delicadas obleas de silicio, por ejemplo (R. V. Fox, 2013). Otra de las aplicaciones, es el decapado de pintura en el sector aeronáutico (D. S. Liebl, 1993).

### *Resumen de la limpieza por láser*

**Tabla 4 Resumen de la limpieza por láser.**

| Resumen de la limpieza por láser |   |  |
|----------------------------------|---|--|
| Método de limpieza               | Ventajas  | Desventajas  |
| <b>Limpieza por láser</b>        | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Elimina gran variedad de contaminantes.</li> <li>• Decapado de pintura.</li> <li>• No utiliza ni partículas abrasivas ni solventes.</li> <li>• No utiliza agua.</li> <li>• Es una limpieza suave, rápida y precisa.</li> <li>• Se puede utilizar en superficies delicadas.</li> <li>• Se puede automatizar o transportar.</li> <li>• Sector principal: Conservación y restauración, microelectrónica y aeronáutica.</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Tecnología en desarrollo.</li> <li>• Alto coste.</li> </ul> |

#### **1.1.5 Limpieza térmica**

Consisten en utilizar altas temperaturas para evaporar o descomponer los contaminantes que tenga la pieza. Las altas temperaturas reducen las fuerzas de adhesión de los residuos, lo que permite eliminarlos fácilmente (M. Li, 2015). Suele necesitar una limpieza complementaria para terminar de limpiar el objeto.

#### **Características**

Esta tecnología permite limpiar tanto superficies manchadas con aceite o grasa, ya que a esas temperaturas estos componentes se evaporan, como hidrocarburos que no contengan cloro o flúor (W. Liu, 2013).

La limpieza térmica se utiliza para realizar la primera limpieza a los componentes, con el objetivo de eliminar contaminantes como grasa, aceite o polvo. Por ello, suele ser necesario complementar la fase de limpieza con una tecnología más física como puede ser la limpieza por ultrasonidos o mediante el chorreado con abrasivos (M. Li, 2015).

Además, mediante la limpieza térmica también se puede eliminar la pintura de las superficies con una temperatura y tiempo razonable (R. Lu, 2013). Consiguiendo altos niveles de eficiencia (M. Li, 2015).

#### **Limitaciones**

Como se ha mencionado anteriormente, la limpieza térmica consiste en utilizar las altas temperaturas para descomponer los contaminantes. Por ello, no se pueden limpiar materiales que tenga un bajo punto de fusión ni que sean inflamables (P. Duan, 2014). El uso de altas temperaturas hace que la limpieza tenga un alto consumo energético. Solo rentable en producciones a gran escala. Además, de necesitar un alto tiempo de limpieza (M. Li, 2015).

La limpieza térmica puede alterar las propiedades de la pieza, por el hecho de calentar la pieza a altas temperaturas y luego enfriarla (M. Li, 2015). Factor muy importante a la hora de remanufacturar, ya que el objetivo de la remanufactura es obtener un producto que tenga las misma o mejores características que uno nuevo.

### Equipamiento

El equipamiento consiste en un horno industrial (Figura 11).



Figura 11.- Horno industrial (limpieza térmica)

### Aplicaciones

Tradicionalmente, esta tecnología se ha usado como primera limpieza a la hora de limpiar motores (M. Li, 2015), donde la suciedad que se quiere eliminar suele ser grasa y pintura. Esta tecnología permite limpiar la grasa de la superficie y eliminar o ablandar la capa de pintura. Facilitando la limpieza de la siguiente tecnología.

Otra de las aplicaciones de esta tecnología, es la limpieza de componentes que tenga un alto punto de fusión, como el hierro fundido. Permitiendo una productividad alta. Ejemplo de ello, es el disco de una caja de cambios que se puede ver en la Figura 12 (R. Lu, 2013).



Figura 11.- Disco de caja de cambios

### *Resumen de la limpieza térmica*

**Tabla 5 Resumen de la limpieza térmica.**

| Resumen de la limpieza térmica |   |   |
|--------------------------------|---|---|
| Método de limpieza             | Ventajas  | Desventajas   |
| Limpieza térmica               | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Elimina grasa, aceite e hidrocarburos.</li> <li>• Puede utilizarse la eliminación de pintura.</li> <li>• Capacidad de limpiar muchas piezas a la vez.</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• No se puede usar ni con materiales que tengan un bajo punto de fusión ni que sean inflamables.</li> <li>• Puede alterar las propiedades de la pieza.</li> <li>• Consumo de energía.</li> <li>• Solo rentable en producciones altas.</li> </ul> |

#### **1.1.6 Limpieza con agua a alta presión**

Esta tecnología de limpieza consiste en utilizar agua a alta presión para eliminar la suciedad de la superficie aprovechando la energía cinética del agua. Es un método de limpieza con una alta eficiencia (R. Lu, 2013). Cuando la superficie a limpiar contiene contaminantes que son difíciles de eliminar, se usa agua caliente para mejorar la limpieza. Además, en algunos equipamientos cabe la posibilidad de añadir alguna solución de limpieza al agua para aumentar la eficiencia de limpieza (A. Arrieta, 2006).

##### **Características**

La limpieza con agua a alta presión, permite eliminar grasa y otros contaminantes de la superficie (W. Liu, 2013). También puede servir para eliminar óxido y pintura (D. S. Liebl, 1993).

La alta eficiencia de limpieza y el bajo coste que tiene esta tecnología, hace de ella una tecnología muy competitiva al igual que versátil, pudiendo automatizar o transportar dependiendo del equipamiento que se adquiere (P. Duan, 2014).

##### **Limitaciones**

Es un proceso que además de consumir grandes cantidades de agua, puesto que el tiempo de contacto entre la superficie y el agua es muy corta, lo contamina. No obstante, hay equipamientos diseñados para limpiar y recircular ese agua (D. S. Liebl, 1993). También, el uso del agua, limita la tecnología para aplicaciones donde la humedad pueda causar algún problema (A. Arrieta, 2006).

Por otro lado, puede generar alguna abolladura en la superficie si este no es lo suficientemente duro o grueso. No hay que olvidar, que se está utilizando una fuerza física para eliminar la suciedad.

##### **Equipamiento**

El equipamiento básico (Figura 13) consiste en:

- Una bomba de alta presión
- Manguera
- Pistola de alta presión



Figura 12.- Equipamiento básico de la limpieza con agua a alta presión

Como se ha mencionado anteriormente, se puede automatizar la limpieza en algunos casos. Para ello, es necesario un equipamiento más complejo como el que se puede ver en la Figura 14.



Figura 13.- Equipamiento automático de la limpieza con agua a alta presión

### Aplicaciones

La limpieza con agua a presión se puede utilizar para limpiar tubos por dentro (A. Arrieta, 2006). Ejemplo de ello, puede ser la limpieza de los tubos de un intercambiador de calor (Figura 15), ya que al ser un objeto tan voluminoso, la limpieza por ultrasonidos es complicado.



Figura 14.- Limpieza de un intercambiador de calor

Otra aplicación, puede ser la eliminación de grasa y polvo de la superficie de una caja de cambios en la fase de pre-limpieza como el que se puede ver en la Figura 16 (R. LU, 2013). Con el inconveniente de tener que secar la caja de cambios si se quiere continuar el proceso de remanufactura con un objeto seco.



Figura 15.- Pre-limpieza de una caja de cambios (limpieza con agua a alta presión)

#### *Resumen de la limpieza con agua a alta presión*

Tabla 6 Resumen de la limpieza con agua a alta presión.

| Resumen de la limpieza con agua a alta presión |   |  |
|--|---|--|
| Método de limpieza                             | Ventajas  | Desventajas  |
| <b>Limpieza con agua a alta presión</b>        | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Elimina grasa, óxido, pintura (presión alta) y otros contaminantes.</li> <li>• Bajo coste y alta eficiencia.</li> <li>• Versátil (equipamiento móvil o automático).</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Consumo y contaminación del agua.</li> <li>• Problemas de humedad en la pieza.</li> <li>• Deformación de la pieza.</li> </ul> |

#### 1.1.7 Limpieza abrasiva

La limpieza abrasiva consiste en usar un material abrasivo como medio de limpieza el cual suele estar mezclado con agua o aire. Mediante un compresor, se acelera la mezcla que al impactar con la superficie elimina la suciedad adherida. Esto sucede, debido a la gran energía cinética y dureza del material abrasivo (D. S. Liebl, 1993).

Los medios abrasivos más comunes son: Partículas de metal, partículas de vidrio, bicarbonato de sodio, bolitas de plástico, pellet de CO<sub>2</sub> y almidón de trigo (D. S. Liebl, 1993).

#### Características

Es un proceso muy eficiente a la hora de eliminar capas superficiales como pintura, óxido o incrustaciones (D. S. Liebl, 1993). Por ello, es muy útil para limpiar objetos que tengan la superficie sucia con algún contaminante y al mismo tiempo se quiera eliminar la capa de pintura. Pudiendo ahorrar un proceso de limpieza. En algunos casos, es necesario complementarlo con una limpieza

química para prevenir problemas de corrosión. Es un proceso muy usado a la hora de eliminar grandes superficies de pintura (D. S. Liebl, 1993).

Para operaciones más delicadas, se usa el abrasivo mezclado con un líquido en lugar de un gas (D. S. Liebl, 1993).

### Limitaciones

Hay que recordar, que es un proceso que elimina la capa superficial de la pieza. Por lo que no es muy adecuado para limpiar residuos líquidos. Además, es posible que dañe el objeto a limpiar, empeorando tanto el acabado superficial como el dimensional (D. S. Liebl, 1993).

La resistencia a la corrosión de los materiales puede verse afectada si el abrasivo es un material propenso a la corrosión. Al mismo tiempo, hay que tener en cuenta, que la limpieza abrasiva puede aumentar la dureza de algunos materiales durante el proceso de limpieza (D. S. Liebl, 1993).

El operario necesita una protección especial debido a las partículas en suspensión que hay en el aire (D. S. Liebl, 1993).

### Equipamiento

Existen diferentes equipos de limpieza, los siguientes tres son los más usados (CLEMCO, 2016):

- **Equipos de chorro portátiles (Figura 17):** Como bien indica su nombre permite transportar el equipo a donde se necesite.



Figura 16.- Equipos de chorros portátiles (abrasivo)

- **Cabinas de chorro de mangas (Figura 18):** Permiten limpiar y chorrear piezas grandes desde fuera de la cabina. Se suele utilizar para limpiar piezas de automoción, industria del metal, etc.



Figura 17.- Cabina de chorro de mangas (abrasivo)

- **Cabinas de chorro (Figura 19):** Permite limpiar piezas muy grandes. Las cabinas pueden tener recuperación, transporte, clasificación y limpieza del abrasivo automática. Se suele utilizar para la industria ferroviaria, naval, etc.



Figura 18.- Cabina de chorro (limpieza abrasiva)

## Aplicaciones

La limpieza abrasiva es aplicable en una gran variedad de materiales: Acero inoxidable, cobre, hierro, aluminio, bronce, titanio, latón, plástico, vidrio, etc. Siempre y cuando se utilice el abrasivo y las condiciones de uso apropiadas (snowhite service, 2016).

Uno de sus aplicaciones puede ser el decapado de pintura a la hora de remanufacturar un componente del sector aeronáutico como se puede observar en la Figura 20 (armex, 2016). La pieza es de níquel y aluminio.

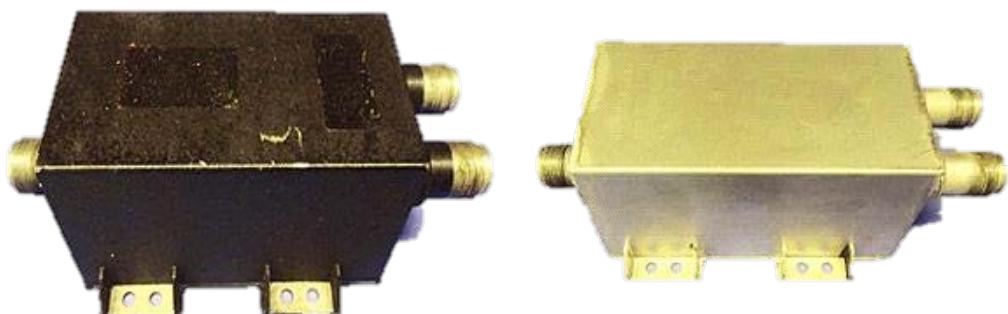


Figura 19.- Decapado de pintura mediante la limpieza abrasiva: antes (a) y después (b)

### Resumen de la limpieza abrasiva

Tabla 7 Resumen de la limpieza abrasiva.

| Resumen de la limpieza abrasiva |   |  |
|---------------------------------|---|--|
| Método de limpieza              | Ventajas  | Desventajas  |
| Limpieza abrasiva               | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Gran eficiencia a la hora de eliminar capa superficiales: Pintura, óxido o incrustaciones.</li> <li>• Permite limpiar objetos voluminosos.</li> <li>• Gran variedad de medios abrasivos, lo que permite limpiar diferentes superficies.</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• No es eficiente a la hora de eliminar residuos líquidos.</li> <li>• Puede dañar la superficie. Empeorando el acabado superficial y el dimensional.</li> <li>• Puede afectar a la resistencia a la corrosión del objeto.</li> <li>• Puede aumentar la dureza de los materiales.</li> <li>• El operario necesita un equipamiento especial (menos en la cabinas de chorro de mangas).</li> </ul> |

## Tecnologías de desmontaje

El desmontaje suele ser de las primeras fases del proceso de remanufactura. Consiste en desmontar la pieza para poder lavar e inspeccionar correctamente todos los componentes a remanufacturar. Se diferencian tres tipos de desmontajes: no destructivo, semi-destructivo y destructivo. Estas tres formas de desmontaje han sido adaptados de *Disassembly Automation* (S. Vongbunyong, 2015).

### 1.1.8 Desmontaje no destructivo

Durante el proceso de desmontaje, ninguno de los componentes de la pieza sufre daño alguno. Por ello, es el tipo de desmontaje idóneo para el mantenimiento y la remanufactura. Por otro lado, al ser un proceso delicado, suele tener un alto coste. Además, una gran flexibilidad es necesaria debido a los diferentes elementos de unión que existen en el mercado. Generalmente, no es un desmontaje viable económicamente.

### 1.1.9 Desmontaje semi-destructivo

El desmontaje semi-destructivo consiste en romper los elementos de unión para poder obtener los componentes deseados sin ningún tipo de daño o casi ninguno. Esto, hace que el proceso sea más eficiente, haciendo el proceso económicamente viable en muchos de los casos. La automatización de este proceso es mucho más sencillo que el del proceso no destructivo. Por ejemplo, a la hora de soltar tornillos, la maquina solo tiene que deformar el tornillo y desenroscarlo, sin tener que identificar sus medidas y forma para elegir el destornillador apropiado.

### 1.1.10 Desmontaje destructivo

Consiste en desmontar una pieza rompiendo los componentes. Así se consigue un desmontaje rápido, eficiente y flexible. Una de sus principales aplicaciones, es la destruir los componentes que dificultan la obtención de un componente valioso dentro de la pieza de una forma rápida y económica.

## Tecnologías de inspección

En esta fase se valora si merece la pena remanufacturar un componente o si al contrario, es necesario usar un componente nuevo para remanufacturar la pieza. Obviamente, las inspecciones se realizaran mediante un ensayo no destructivo (NDT) para no dañar el componente.

Dichas inspecciones, se han clasificado en tres grupos: superficial/volumétrica, dimensional y prueba eléctrica.

### 1.1.11 Superficial/Volumétrica

Las inspecciones superficiales o volumétricas permiten identificar defectos superficiales o internos, como pueden ser grietas o poros. A continuación, se exponen los detalles de las diferentes tecnologías obtenidas de *Manufactura, ingeniería y tecnología* (S. Kalpakjian, 2008).

### 1.1.11.1 Inspección visual

La inspección visual consiste en inspeccionar la pieza usando el ojo humano en busca de imperfecciones (Figura 21). Es el primer ensayo que se debe hacer antes de recurrir a NDT más sofisticados y caros. Puesto que la imperfección puede ser tan notable que no es necesario mal gastar el dinero usando técnicas más complejas.



Figura 20.- Inspección visual

La herramienta principal de este ensayo es el ojo humano, pero se pueden utilizar instrumentos complementarios como microscopios o cámaras para facilitar y mejorar la precisión del ensayo. A pesar de ello, es aconsejable aplicar un NDT que complemente la inspección visual si se requiere mayor precisión (IAEA, 1999).

### 1.1.11.2 Líquidos penetrantes

El ensayo por líquidos penetrantes es un ensayo no destructivo que se emplea para detectar e indicar discontinuidades abiertas a la superficie (defectos superficiales) en materiales sólidos no porosos (grietas, costuras, poros, etc.).

El principio en el cual se basa esta técnica no destructiva es la capacidad de que un líquido pueda penetrar por capilaridad y ser retenido en las discontinuidades abiertas a la superficie como pueden ser fisuras y poros (Figura 22).

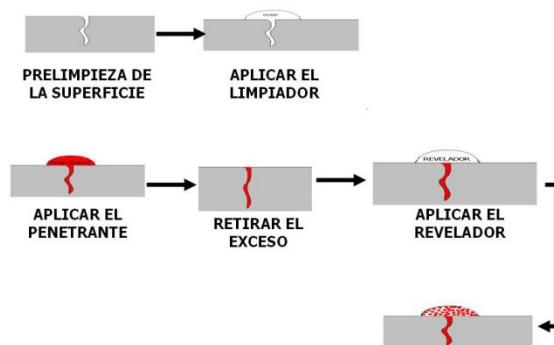


Figura 21.- Procedimiento de líquidos penetrantes

La ventaja principal es que el equipo es simple y de uso sencillo; además, puede ser portátil y su operación es menos costosa que la de otros métodos. Sin embargo, sólo puede detectar defectos que se encuentran abiertos a la superficie o que son externos (Figura 23).



Figura 22.- Ejemplo de defectos (líquidos penetrantes)

#### 1.1.11.3 Inspección mediante partículas magnéticas

Esta técnica consiste en colocar partículas ferromagnéticas finas en la superficie de la parte. Las partículas se pueden aplicar en seco o con un portador líquido, como agua o aceite. Cuando se magnetizan con un campo magnético, la discontinuidad (defecto) sobre la superficie hace que las partículas se reúnan visiblemente alrededor del defecto (Figura 24).

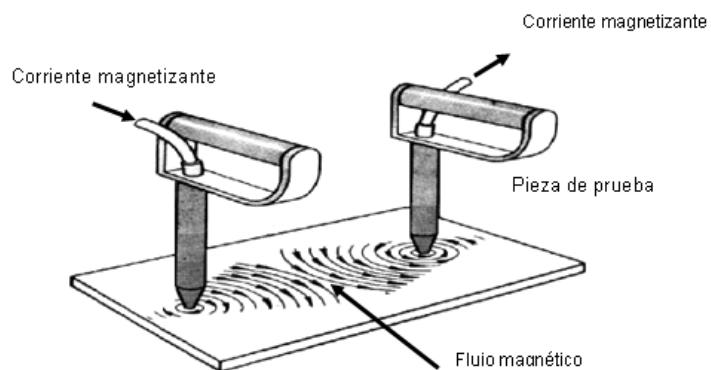


Figura 23.- Inspección mediante partículas magnéticas

Por lo general, las partículas toman la forma y el tamaño del defecto. Los defectos debajo de la superficie también se pueden detectar mediante este método, siempre que no sean profundos. Es posible colorear las partículas magnéticas con pigmentos para mejorar la visibilidad sobre superficies metálicas (Figura 25).

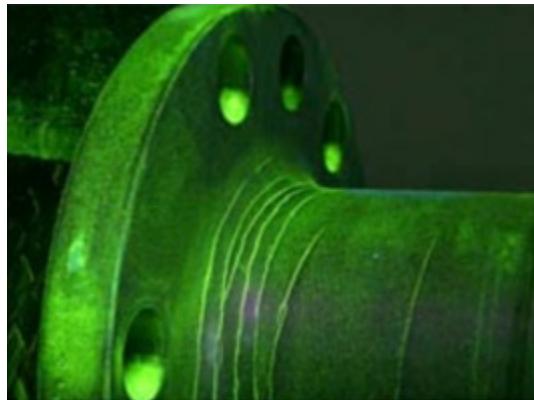


Figura 24.- Partículas magnéticas con pigmentos

Los campos magnéticos también se pueden generar con corriente directa o alterna, utilizando yugos, barras o bobinas. La mejor manera de detectar los defectos debajo de la superficie es con corriente directa. El método de las partículas magnéticas sólo se puede utilizar con materiales ferromagnéticos, pero las partes pueden desmagnetizarse y limpiarse después de la inspección. El equipo sería portátil o estacionario.

#### 1.1.11.4 Inspección por ultrasonidos

En esta técnica, una onda ultrasónica viaja a través de la pieza. Los defectos internos (como las grietas) interrumpen la onda y reflejan parte de la energía ultrasónica. La amplitud de la energía reflejada y el tiempo requerido para su retorno indican la presencia y ubicación de cualquier defecto en la pieza de trabajo (Figura 26).

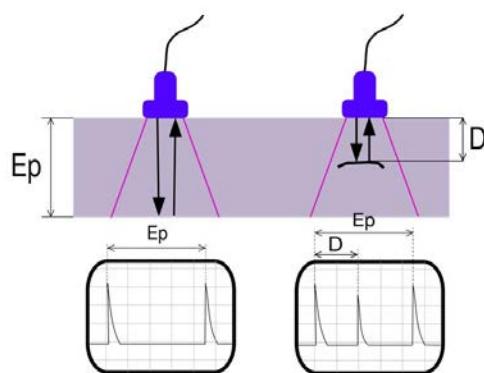


Figura 25.- Funcionamiento de la inspección por ultrasonidos

Las ondas ultrasónicas se generan mediante transductores (sondas), disponibles en diversos tipos y tamaño. Los transductores funcionan con base en el principio de la piezoelectricidad utilizando materiales como cuarzo, sulfato de litio o diversos materiales cerámicos. La mayoría de las

inspecciones se realizan en un intervalo de frecuencia de 1 a 25 MHZ. Para transmitir las ondas ultrasónicas del transductor a la pieza de prueba se utilizan acopladores; los más comunes son agua, aceite glicerina y grasa.

El método de inspección ultrasónica tiene gran poder de penetración y sensibilidad. Sirve para realizar tanto una inspección volumétrica como superficial. Se puede utilizar desde diversas direcciones para inspeccionar defectos en partes grandes, como en ruedas de ferrocarril, recipientes a presión y portamatrices. La gran desventaja de este método, es la necesidad de un personal con experiencia para poder conducir la inspección de manera apropiada e interpretar correctamente los resultados (Figura 27).



Figura 26.- Resultados: inspección por ultrasonidos

#### 1.1.11.5 Métodos acuáticos

La técnica de emisión acústica detecta señales (ondas de esfuerzos de alta frecuencia) generadas por la propia pieza de trabajo durante la deformación plástica, la iniciación y propagación de grietas, la transformación de fase y la reorientación abrupta de los límites de grano. La formación de burbujas durante la ebullición de un líquido y la fricción y el desgaste de las interfaces deslizantes son otras fuentes de señales acústicas.

La inspección por emisión acústica suele realizarse aplicando esfuerzos elásticos a la parte o estructura, como doblando una viga, aplicando torque a una flecha o presurizando internamente un recipiente (Figura 28). Por lo general, los sensores consisten en elementos cerámicos piezoelectricos que detectan emisiones acústicas. Este método es muy efectivo para inspección continua de estructuras que soportan cargas.

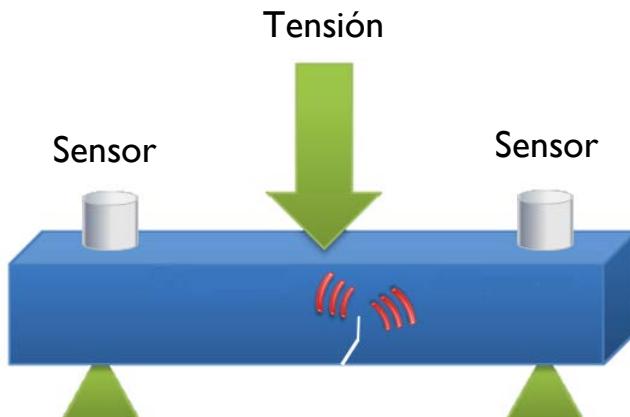


Figura 27.- Método de la inspección acústica

La técnica del impacto acústico consiste en golpear en forma ligera la superficie de un objeto, escuchando y analizando las señales para detectar discontinuidades y defectos. El principio es básicamente el mismo que cuando uno golpea paredes, cubiertas de escritorio o fondos en diversos lugares con un dedo o con un martillo y escucha el sonido emitido. La técnica del impacto acústico se realiza con facilidad y se puede instrumentar y automatizar. Sin embargo, los resultados dependen de la geometría y masa de la pieza, por lo que es necesario un patrón de referencia para identificar los defectos.

#### 1.1.11.6 Radiografía

La radiografía utiliza la inspección mediante rayos X para detectar defectos internos como grietas y porosidad; por ello, se puede utilizar tanto para realizar una inspección volumétrica como superficial. El principio implica las diferencias de densidad dentro de la parte (Figura 29). Por ejemplo, es común que el metal que rodea un defecto sea más denso y que en consecuencia, aparezca como más ligero que los defectos en una película de rayos X.

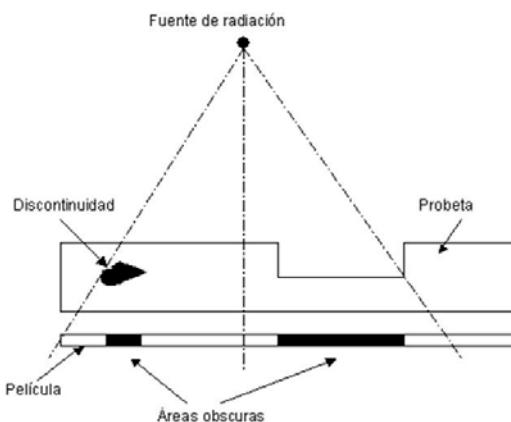


Figura 28.- Funcionamiento de la inspección por radiografía

Por lo general, la fuente de radiación es un cañón de rayos X que producen una imagen permanente visible sobre la película radiográfica o en un arreglo de sensores (radiografía digital). Esto, se puede ver en la Figura 30. También se utilizan fluoroscopios para producir

imágenes de rayos X con rapidez, y constituye una técnica de radiografía en tiempo real que muestra eventos conforme ocurren.

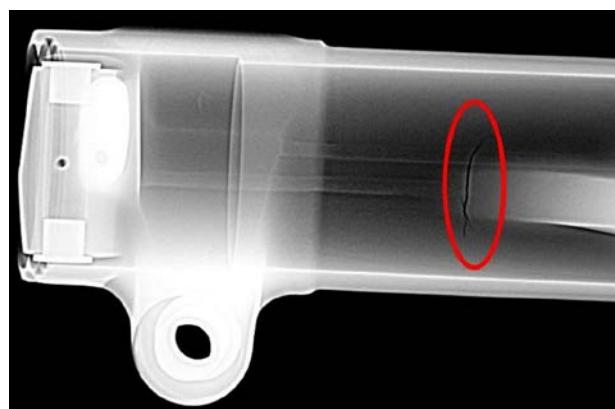


Figura 29.- Resultado de una radiografía

La radiografía requiere equipos costosos, interpretación apropiada de los resultados y puede constituir un riesgo de radiación.

#### 1.1.11.7 Inspección mediante corrientes parasitas

Este método se basa en el principio de la inducción electromagnética. La pieza se coloca en una bobina eléctrica o junto a ella, por la que fluye corriente alterna a frecuencias que van de 60 HZ a 60 MHz. Esta corriente provoca corrientes parasitas o de eddy en la pieza. Los defectos en la parte impiden y cambian la dirección de las corrientes parasitas y provocan cambios en el campo electromagnético que afecta la bobina excitadora (bobina de inspección), cuyo voltaje se supervisa para determinar la presencia de defectos (Figura 31).

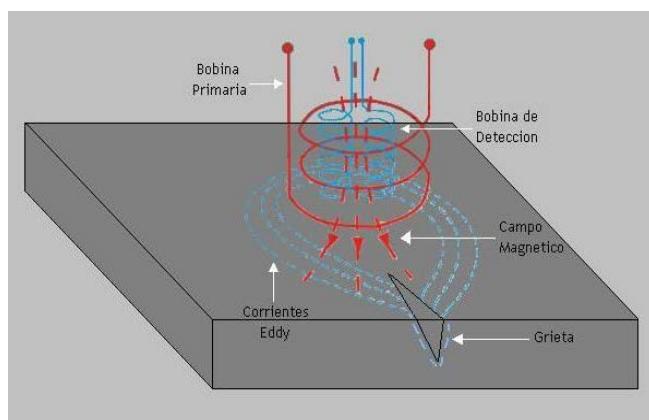


Figura 30.- Funcionamiento de la inspección mediante corrientes parásitas

Se pueden fabricar bobinas de inspección de diferentes tamaños y formas para adaptarse a la geometría de la pieza a inspeccionar. Las piezas deben ser eléctricamente conductoras y, por lo general, la profundidad de los defectos está limitada en 13 mm. La técnica requiere el uso de una muestra de patrón de referencia para ajustar la sensibilidad del probador (Figura 32).



**Figura 31.-** Obteniendo patrón de referencia.

### 1.1.11.8 Inspección térmica

La inspección térmica comprende el uso de dispositivos sensores de calor del tipo de contacto y sin contacto que detectan los cambios de temperatura. Los defectos en la pieza de trabajo (como grietas, regiones separadas en estructuras laminadas y uniones deficientes) causan un cambio en la distribución de la temperatura. Además, permite verificar el correcto funcionamiento de los componentes electrónicos al compararlos con el patrón de referencia (Figura 33).

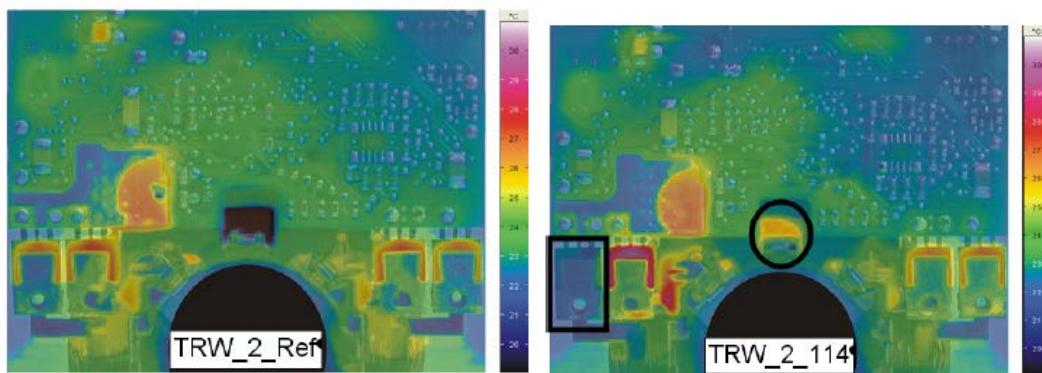


Figura 32.- Inspección térmica de un circuito impreso: patrón de referencia (a), componente con defectos (b).

En la inspección termografía se aplican algunos materiales (como pintura y papel sensibles al calor, cristales líquidos y otros recubrimientos) a la superficie de la pieza de trabajo. Cualquier cambio en su color o apariencia indica defectos. El método más común de inspección termografía sin contacto utiliza sensores de luz infrarroja (por lo común microscópica o cámaras de barrido infrarrojo), que tienen un tiempo alto de respuesta y sensibilidades elevadas de 1 °C. La inspección termométrica, por otro lado, usa dispositivos como termopares, radiómetros, pirómetros.

### 1.1.1 Dimensional

La inspección dimensional consiste en medir las dimensiones de los componentes para verificar si ha habido alguna alteración en sus dimensiones durante su uso. Dependiendo de la precisión, rapidez o de la inversión que se quiera realizar, existen diferentes tecnologías.

#### 1.1.1.1 Medición manual

Consisten en medir un objeto con la ayuda del ojo humano y un instrumento escalado. El instrumento puede ser un calibre (Figura 34), un metro, un micrómetro, etc.

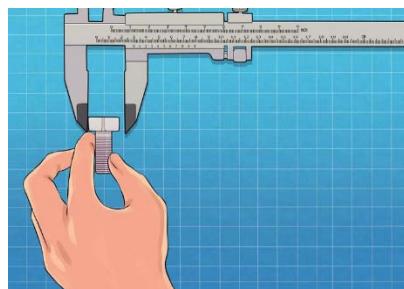


Figura 33.- Medición con calibre

#### 1.1.1.2 *Medición por láser*

La medición por láser se basa en el cambio de al menos un parámetro de la radiación laser debido a la interacción con el objeto a medir (R. Poprawe, 2011). Esto, permite medir los componentes sin ningún tipo de contacto mecánico. Es una tecnología de medición rápida, además de adaptarse fácilmente a diferentes formas y materiales (Figura 35).



Figura 34.- Micrómetro láser

#### 1.1.1.3 *Medición mediante escáner 3D*

La medición median escáner 3D consiste en analizar un objeto con el fin de obtener datos de su forma sin ningún tipo de contacto (Figura 36). La digitalización del objeto se compara con el diseño en CAD o con una digitalización antero de una pieza nueva para buscar algún error en el objeto. Esto, permite inspeccionar la pieza de una forma rápida. Además, también se puede utilizar para la ingeniería inversa (Caddy, 2017).

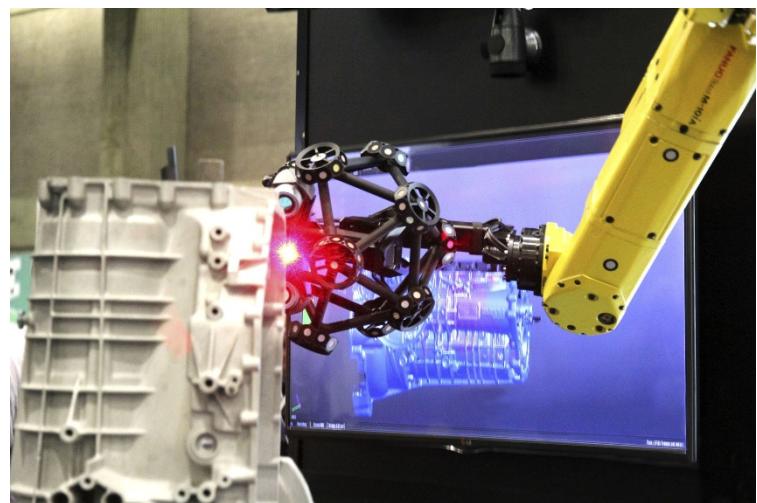


Figura 35.- Escáner 3D

#### 1.1.1.4 *Medición por contacto*

La tecnología se basa en la obtención de un registro de coordenadas para medir la pieza. Dicho registro, se consigue mediante el contacto del palpador con la pieza (Figura 37). Es una tecnología que se caracteriza por su precisión; pero hay que destacar, que es más lenta que la medición por láser.

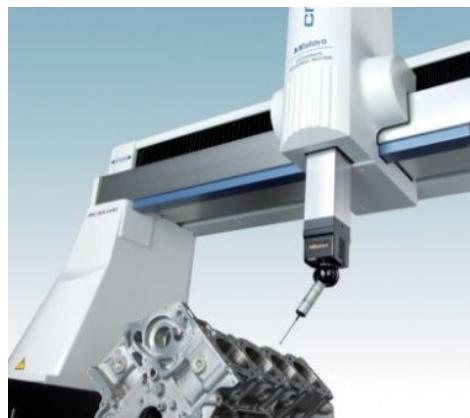


Figura 36.- Medición por contacto

### 1.1.1 Prueba eléctrica

En la prueba eléctrica se analiza si los componentes eléctricos o electrónicos de un objeto funcionan correctamente. Dependiendo de la complejidad del objeto se elegirá una tecnología u otra.

#### 1.1.1.1 *Prueba funcional*

Mediante este ensayo, se verifica si el aparato funciona correctamente. Es decir, se ponen en marcha el aparato y se analiza si hay alguna anomalía en su comportamiento. Es el ensayo más simple de todos.

#### 1.1.1.2 *Multímetro*

El multímetro es un instrumento que permite medir diferentes magnitudes eléctricas tales como tensión (alterna y continua), intensidad (alterna y continua) y resistencia. También, permite medir magnitudes como capacidades, temperatura, frecuencia o la continuidad entre dos puntos.

Esta técnica, se utiliza para identificar los componentes del aparato que no funcionan correctamente (Figura 38). Es una tecnología barata, pero al ser un proceso totalmente manual, ya que hay que ir analizando cada componente uno a uno, hace que los tiempos de inspección sean largos.

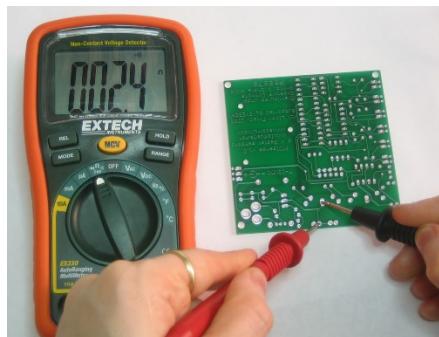


Figura 37.- Multímetro

#### 1.1.1.3 Cama de clavos o pinchos

El ensayo de cama de clavos, permite comprobar el funcionamiento de un circuito impreso de una forma rápida. Al igual que con el multímetro, el ensayo consisten en inspeccionar cada componente en busca de defectos. Pero con una gran diferencia, los componentes se analizan todos a la vez, y no uno a uno como con el multímetro. Esto, permite terminar el ensayo en cuestión de segundo. La desventaja, aparte de ser una tecnología mucho más cara, es el hecho que a cada circuito hay que diseñar y fabricar su cama de clavos específica (Figura 39). Siendo una tecnología poco versátil (Radio-electronics, 2017).

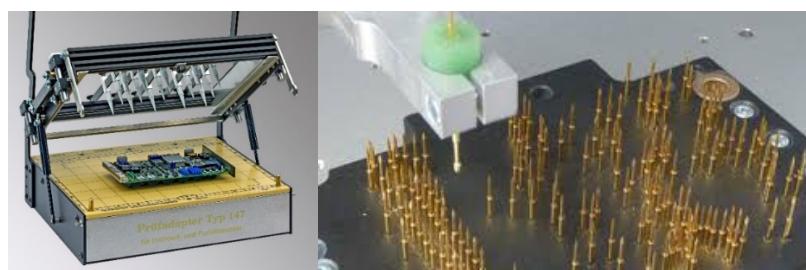


Figura 38 Máquina de cama de clavos: maquina (a), cama de clavos (b).

#### 1.1.1.4 Sonda de vuelo

El ensayo mediante la sonda de vuelo, es una especie de multímetro automático. Comprueba el funcionamiento de cada componente utilizando sondas (Figura 40). Estas sondas, son controladas mediante un software. Es un ensayo más lento que el ensayo de cama de clavos, pero es mucho más versatilidad. Puesto que si hay alguna modificación en el circuito impreso, se puede solucionar fácilmente aplicando el cambio en el software (Radio-electronics, 2017).



Figura 39.- Máquina de sonda de vuelo

## Tecnologías de reacondicionamiento

Las tecnologías de reacondicionamiento son aquellas que sirven para reparar o fabricar los componentes dañados. Es imposible realizar una lista que clasifique todas las tecnologías, puesto que de un producto a otro varía mucho las operaciones que necesita la pieza para ser fabricada o reparada. Además, las mayorías de las empresas ya están equipadas para realizar esta fase.

Aun así, en las siguientes imágenes se puede apreciar los principales procesos que se le pueden realizar a una pieza. Los procesos, se han clasificado en 6 grupos: procesos de mecanizado y acabado (Figura 41), procesos de fundición (Figura 42), procesos de formado y moldeado (Figura 43), transformación de chapa (Figura 44), procesado de polímeros (Figura 45) y procesos de unión (Figura 46).

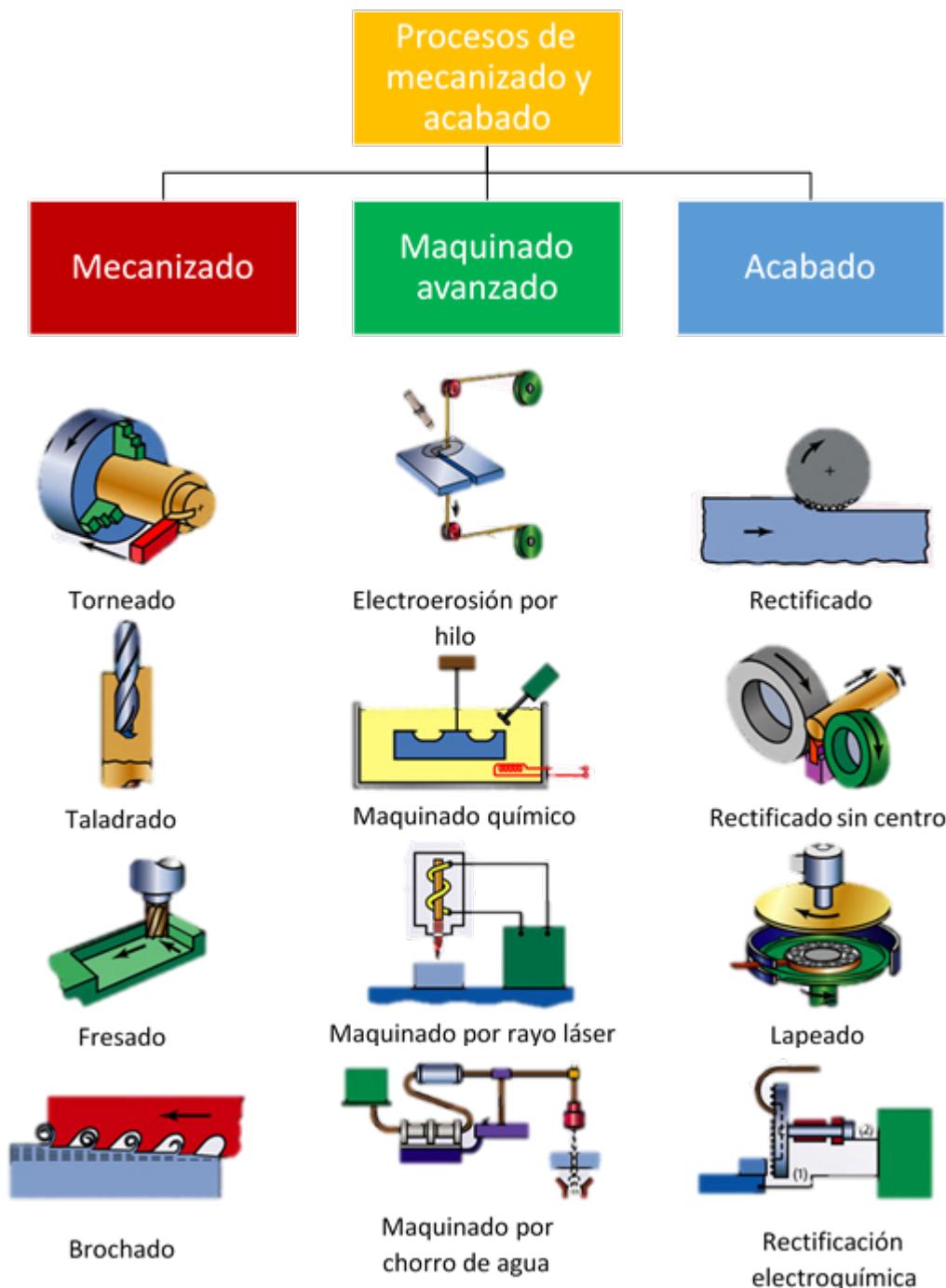


Figura 40.- Procesos de mecanizado y acabado

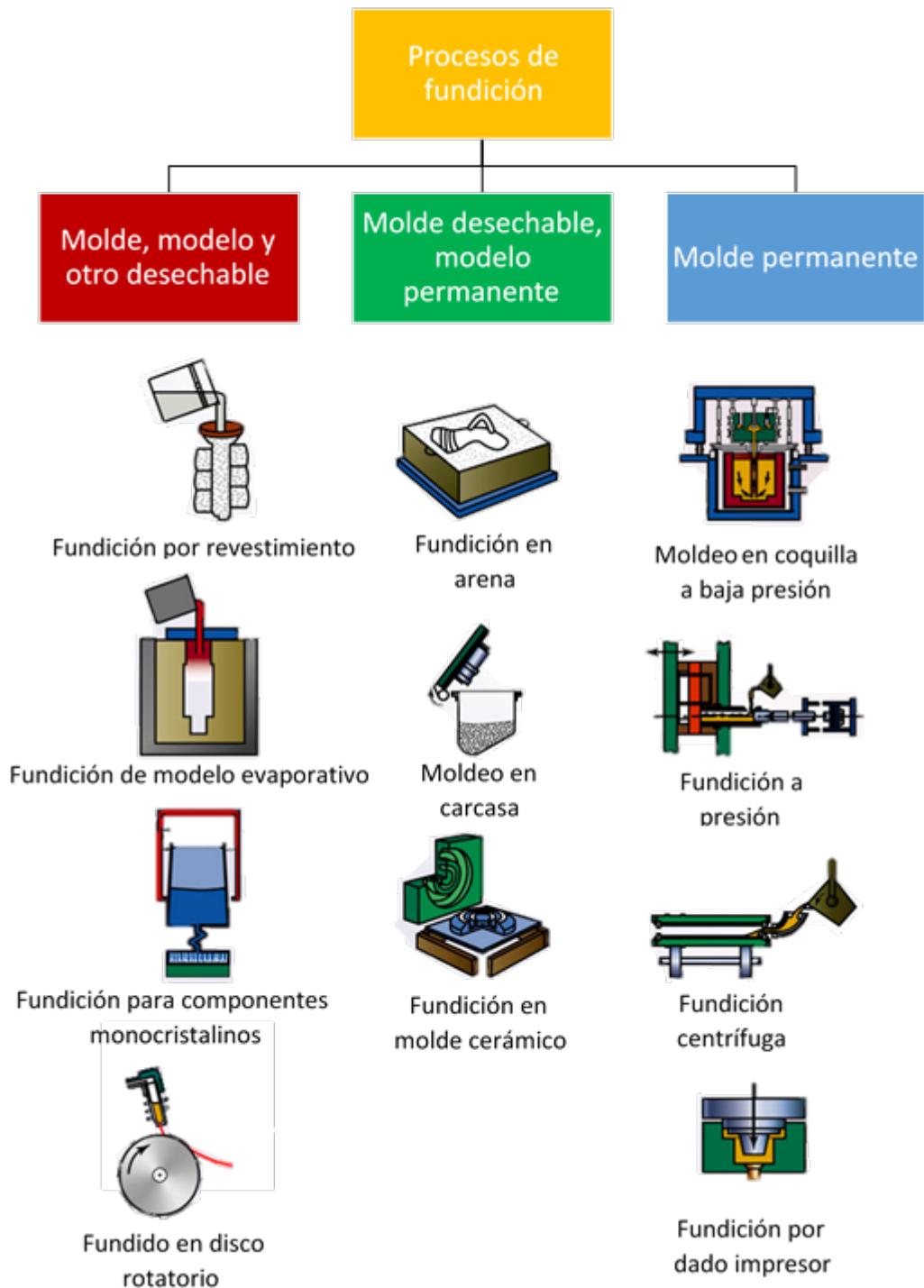


Figura 41.- Procesos de fundición

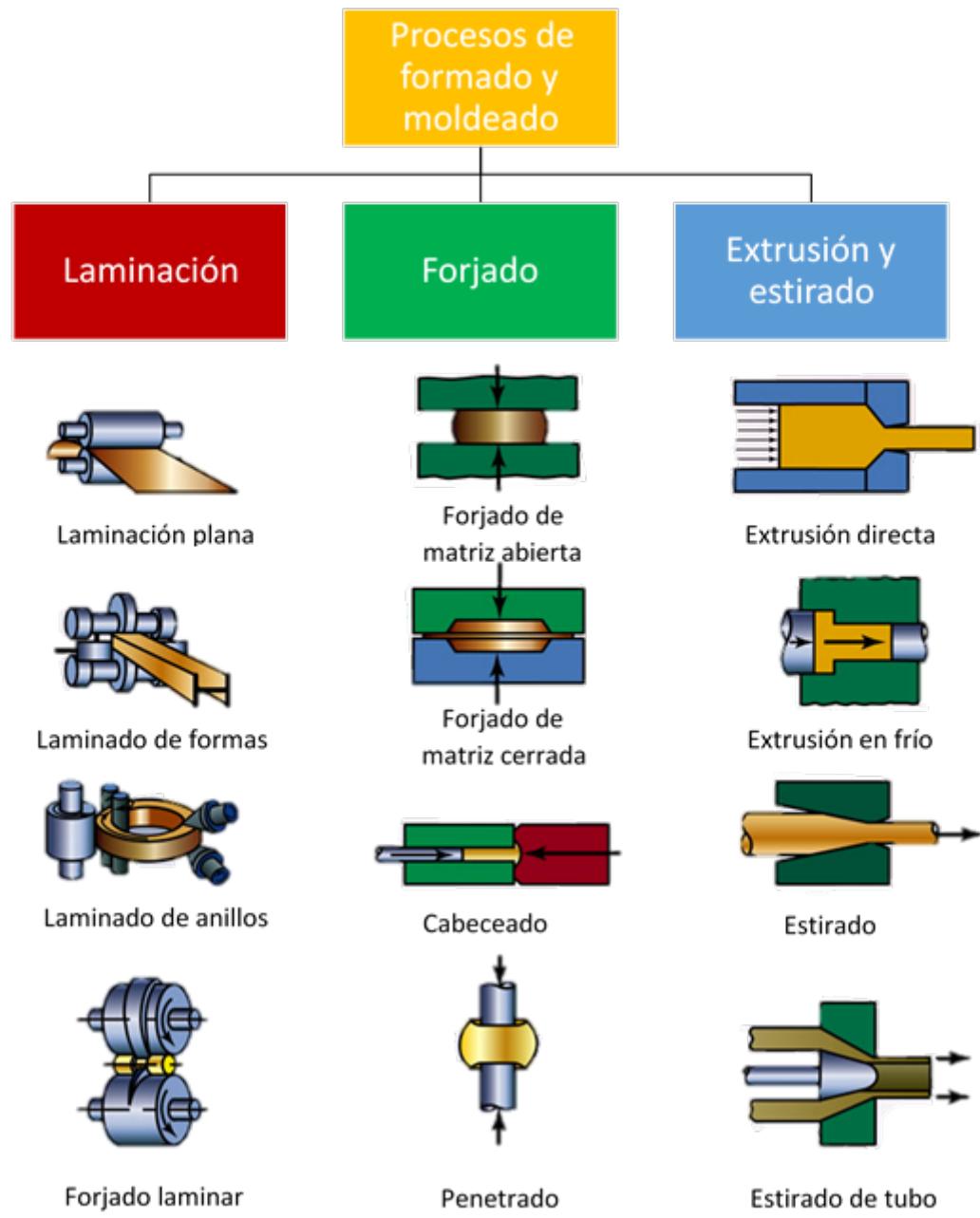


Figura 42.- Procesos de formado y moldeado



**Figura 43.- Transformación de chapa**

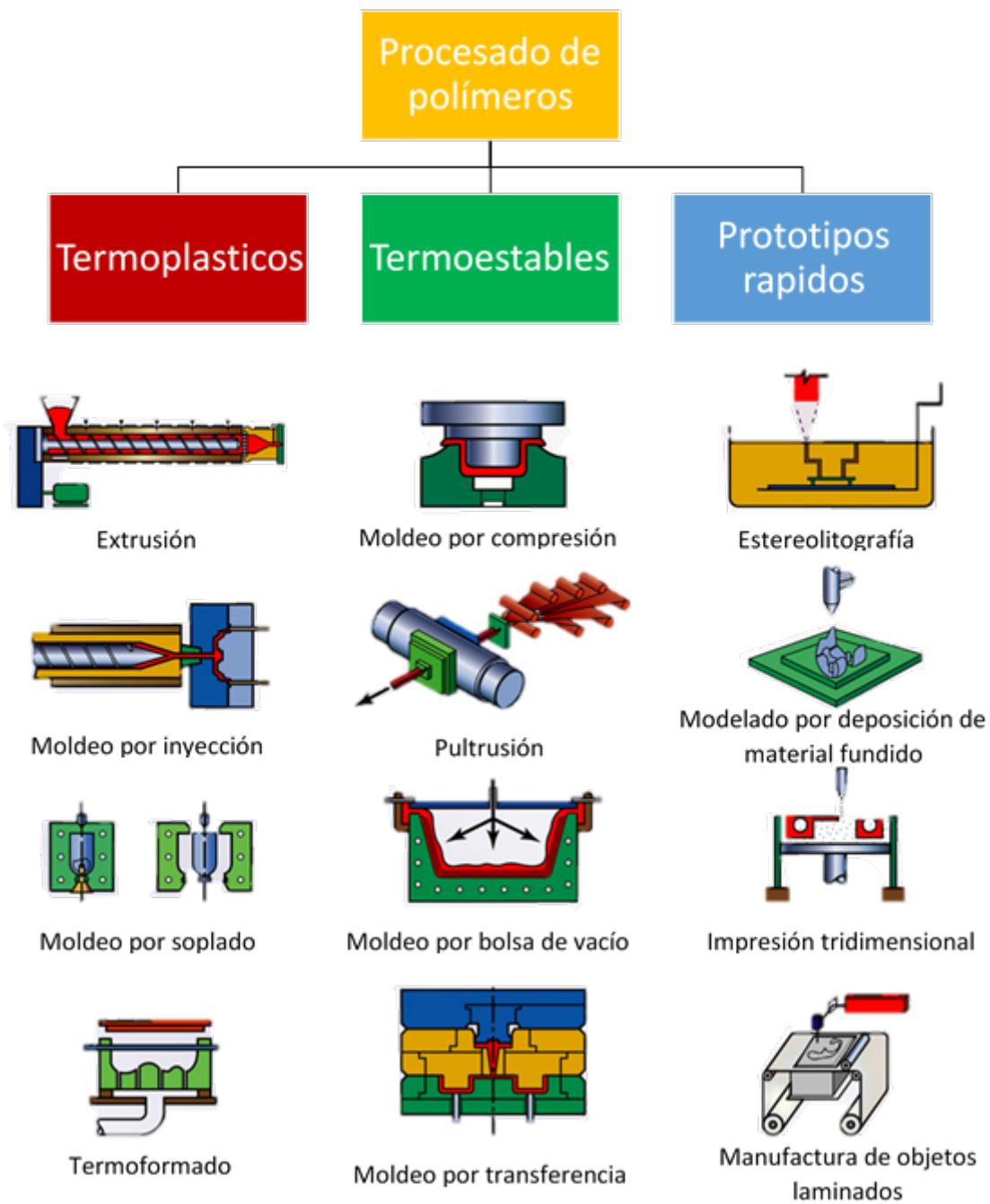


Figura 44.- Procesado de polímeros



**Figura 45.- Procesos de unión.**

## Tecnologías de ensamblaje

Para la fase de ensamblaje se utiliza la misma tecnología que a la hora de montar un producto nuevo. No hay diferencia entre la manufactura y remanufactura. Cada empresa tiene su sistema de montaje y la tecnología que necesite para ello.

## Tecnologías para test

Al igual que en las tecnologías de ensamblaje, en esta fase, tampoco hay diferencia entre el proceso de manufactura y remanufactura. El producto remanufacturado debe de tener las mismas características que uno nuevo, por lo que tendrá que pasar las mismas pruebas. Es decir, habrá que usar la misma tecnología.

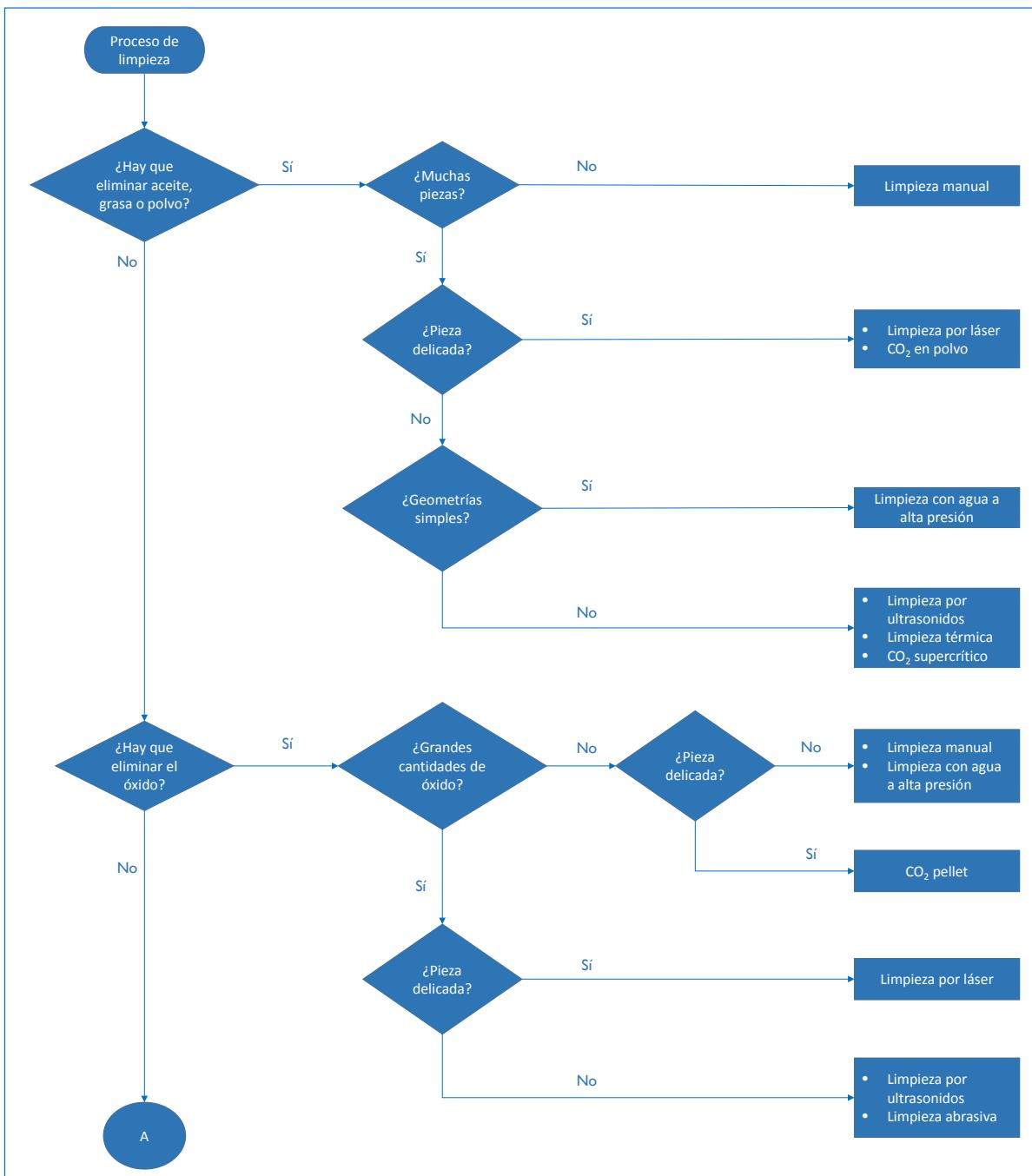
## Metodología para la selección de tecnologías

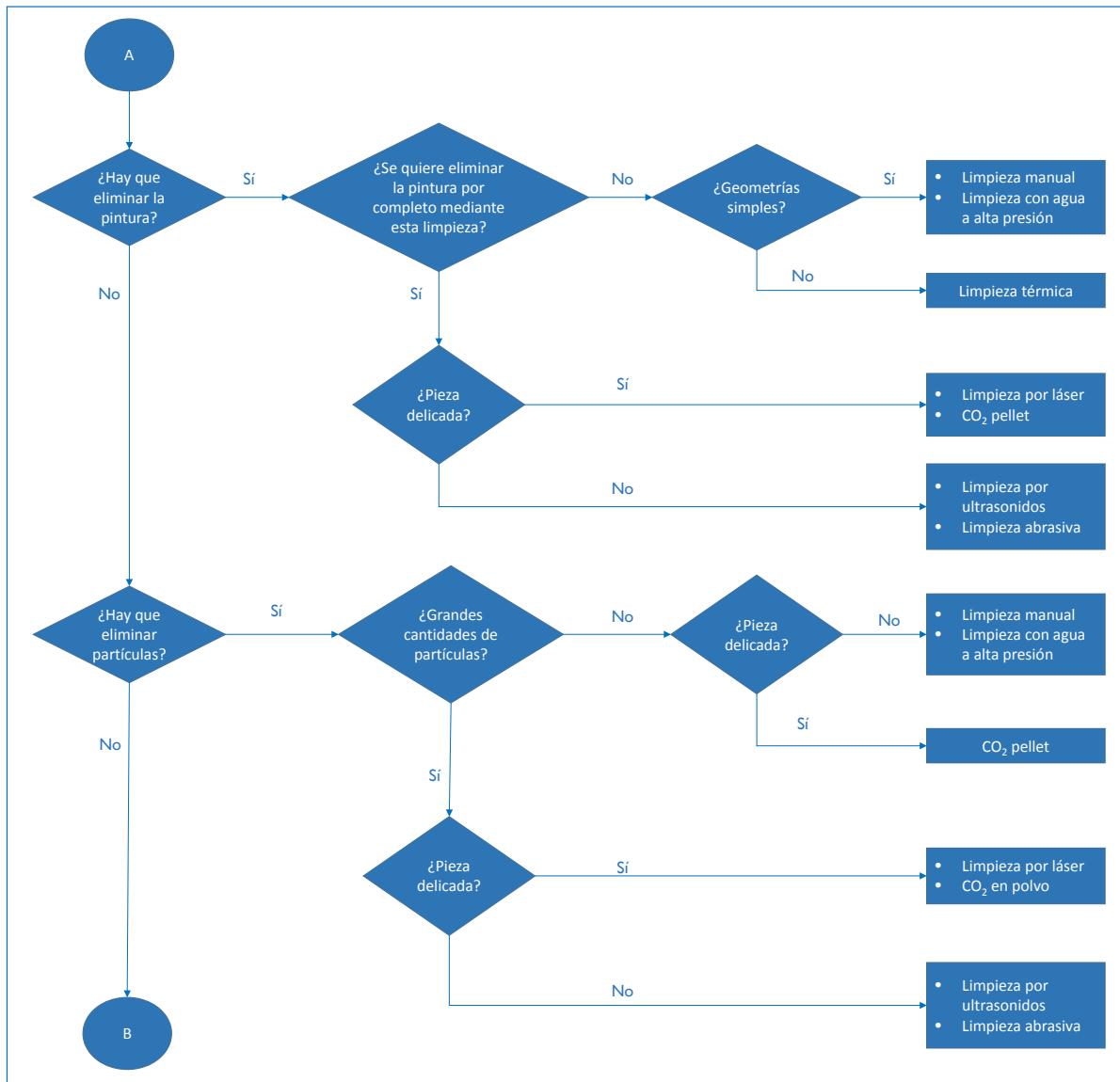
Con el fin de ayudar en la selección de la tecnología más apropiada para cada fase del proceso, se han realizado unas tablas y unos diagramas de flujo de las tecnologías que faltan por implementar en las empresas (limpieza, desmontaje, inspección y reacondicionamiento), para realizar el proceso de remanufactura. Hay que destacar, que los diagramas son totalmente orientativos, puesto que la selección de cada tecnología está condicionado por un millón de factores, y es imposible realizar un diagrama que tenga todas en cuenta.

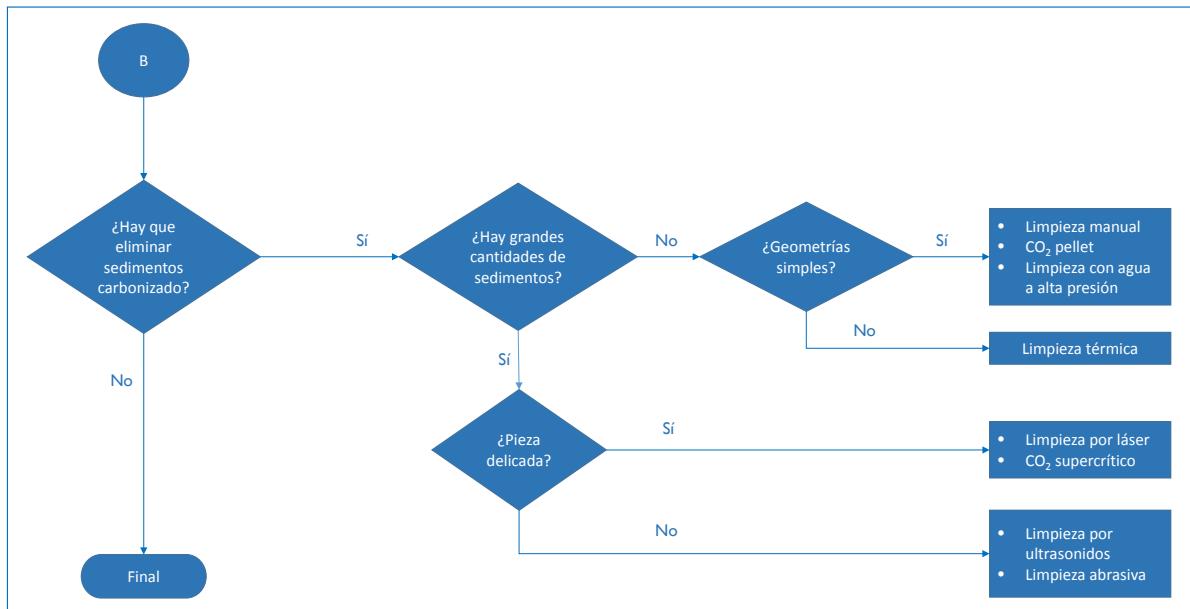
## Tecnologías de limpieza

Para facilitar la selección de las tecnologías de las fases de limpieza, se han realizado dos tablas y un diagrama de flujo. El diagrama (Figura 47), está diseñado para poder seleccionar la tecnología más apropiada para cada componente la hora de eliminar diferentes tipos de suciedades. La Tabla 8, permite analizar la compatibilidad de las diferentes tecnologías con el material a limpiar. Por último, la Tabla 9, compara la eficiencia de cada tecnología a la hora de eliminar las suciedades más comunes. Mediante esta tabla, se quiere presentar una visión general acerca del tipo de suciedad que puede eliminar cada tecnología.

El proceso de selección consiste en utilizar primero el diagrama de la Figura 47, para elegir la tecnología o tecnologías que mejor se adapte las características que se estén buscando. Posteriormente, se utiliza la Tabla 8, para poder confirmar que no hay ningún impedimento en utilizar dicha tecnología con el componente que se quiere limpiar. Si mediante el diagrama no se consigue ninguna tecnología que convenza, se puede utilizar la Tabla 9 para seleccionar todas las tecnologías que sean capaz de eliminar la suciedad deseada; y así, elegir la que mejor se adapte a las necesidades de cada empresa.







**Figura 46.- Diagrama de flujo: limpieza.**

Como ya se ha mencionado antes, la Tabla 8 permite analizar la compatibilidad de las tecnologías con el material a limpiar. El color verde significa que la tecnología se puede aplicar en dicho material sin ningún problema. En el otro lado, está el color rojo, que significa la no compatibilidad de la tecnología con el material. El color naranja, por su parte, significa que en algunos casos es posible y en otros no; es decir, hay que analizar cada caso.

**Tabla 8.- Compatibilidad del material con la tecnología: limpieza.**



## Tecnologías de desmontaje

Como se ha explicado antes, los componentes de una pieza se pueden desmontar mediante tres técnicas: desmontaje no destructivo, semi-destructivo o destructivo. Para saber cuándo utilizar cada técnica se puede utilizar el diagrama de la Figura 48, el cual indica el tipo de desmontaje que más le puede convenir a cada componente.

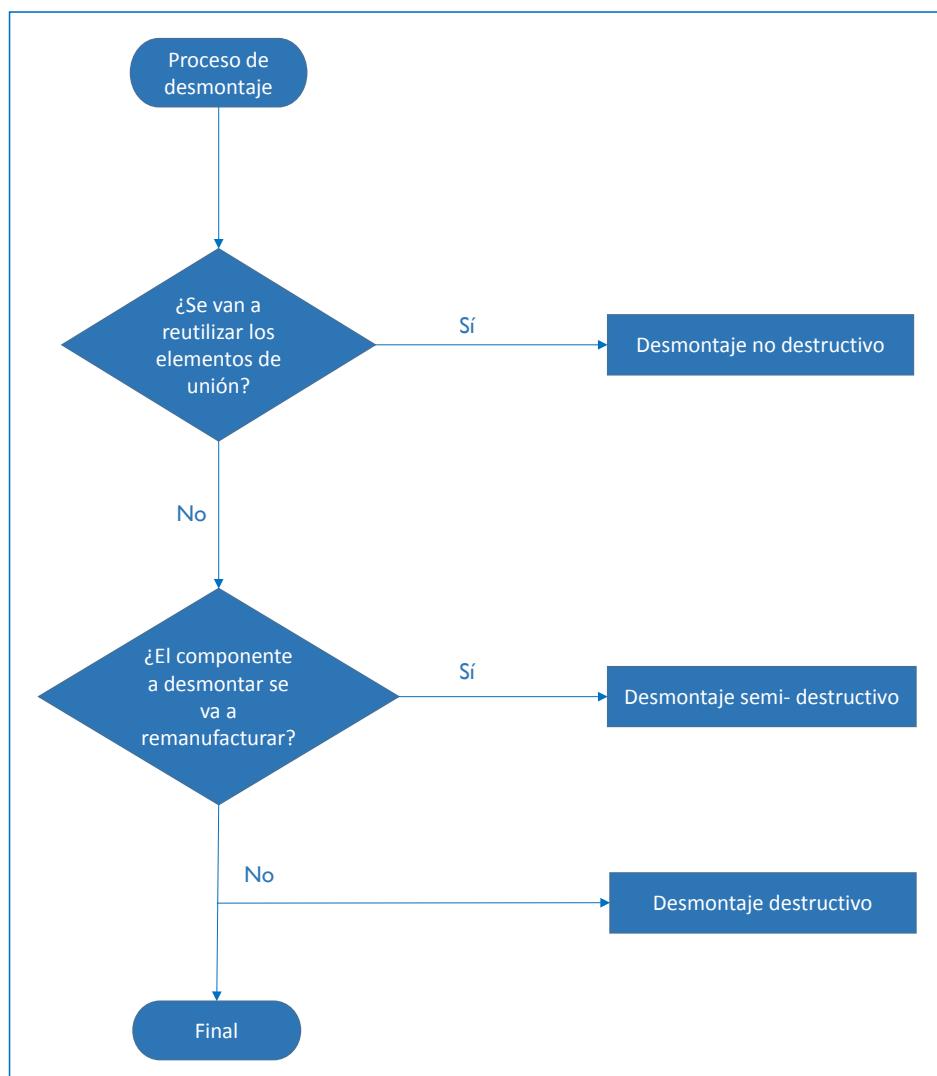
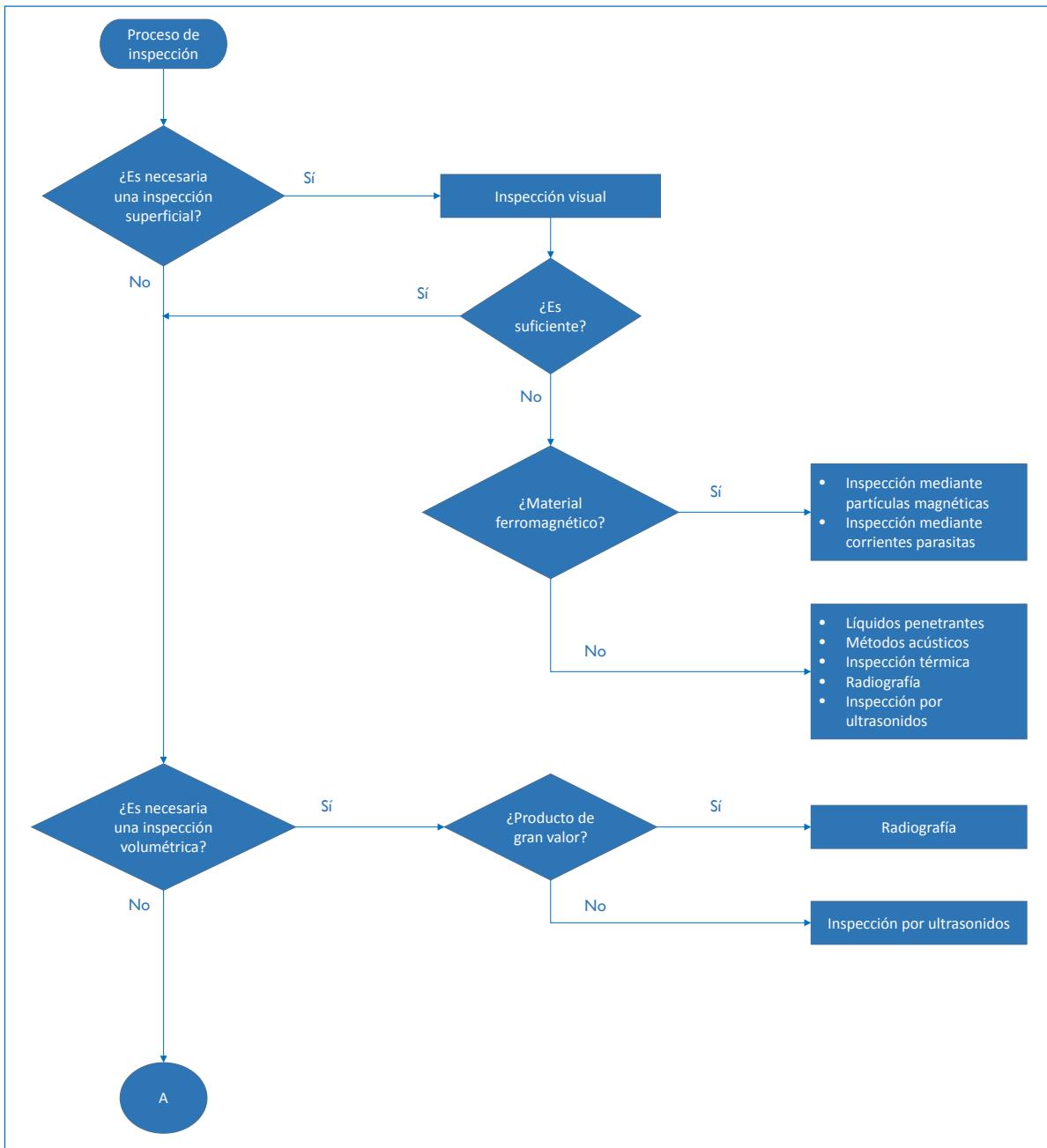


Figura 47.- Diagrama de flujo: desmontaje

## Tecnologías de inspección

Para la fase de inspección se ha diseñado tanto un diagrama de flujo como una tabla. El diagrama de flujo, permite llegar de una forma rápida a la tecnología o tecnologías que más se puede ajustando al componente que se quiere analizar. Por otro lado, la Tabla 10 muestra la compatibilidad entre la tecnología de inspección y el material a analizar. Esto, permite eliminar las tecnologías que no son aplicables al material (componente) que se quiere analizar.

El procedimiento a seguir, es el mismo que el de la fase de limpieza. Consisten en utilizar el diagrama de la Figura 49 para seleccionar la tecnología o tecnologías que mejor se ajusten al tipo de inspección que se busca (superficial, volumétrica, dimensional o prueba eléctrica), y una vez seleccionada la o las tecnologías, el siguiente paso es utilizar la Tabla 10 para verificar si dicha tecnología es compatible con el componente.



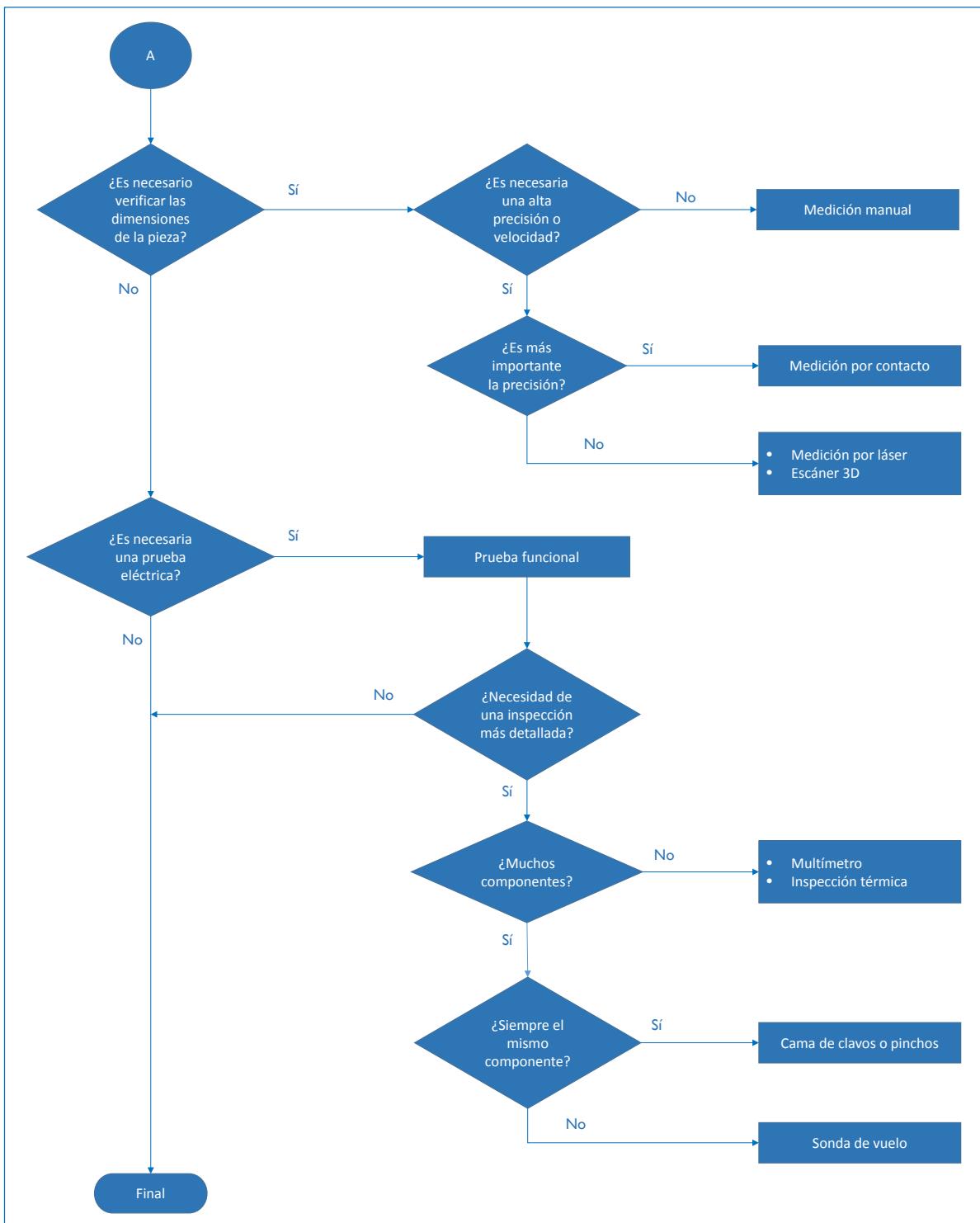


Figura 48.- Diagrama de flujo: inspección

**Tabla 10.- Compatibilidad del material con la tecnología: inspección**

| Tecnologías                  |   | Materiales |           |          |                     |       |               |             | Componentes electrónicos |  |
|------------------------------|---|------------|-----------|----------|---------------------|-------|---------------|-------------|--------------------------|--|
|                              |   | Férricos   |           | Metales  |                     |       | Polímeros     |             |                          |  |
|                              |   | Acero      | Fundición | Aluminio | Aleaciones de cobre | Otros | Termoplástico | Termostable |                          |  |
| Superficial/<br>Volumétrica* | Inspección visual                         |            |           |          |                     |       |               |             |                          |  |
|                              | Líquidos penetrantes                      |            |           |          |                     |       |               |             |                          |  |
|                              | Inspección mediante partículas magnéticas |            |           |          |                     |       |               |             |                          |  |
|                              | Inspección por ultrasonidos*              |            |           |          |                     |       |               |             |                          |  |
|                              | Métodos acústicos                         |            |           |          |                     |       |               |             |                          |  |
|                              | Radiografía*                              |            |           |          |                     |       |               |             |                          |  |
|                              | Inspección mediante corrientes parásitas  |            |           |          |                     |       |               |             |                          |  |
| Dimensional                  | Inspección térmica                        |            |           |          |                     |       |               |             |                          |  |
|                              | Medición manual                           |            |           |          |                     |       |               |             |                          |  |
|                              | Medición por láser                        |            |           |          |                     |       |               |             |                          |  |
|                              | Escáner 3D                                |            |           |          |                     |       |               |             |                          |  |
| Prueba eléctrica             | Medición por contacto                     |            |           |          |                     |       |               |             |                          |  |
|                              | Prueba funcional                          |            |           |          |                     |       |               |             |                          |  |
|                              | Multímetro                                |            |           |          |                     |       |               |             |                          |  |
|                              | Cama de clavos o pinchos                  |            |           |          |                     |       |               |             |                          |  |
|                              | Sonda de vuelo                            |            |           |          |                     |       |               |             |                          |  |

## Tecnologías de reacondicionamiento

Las tecnologías de la fase de reacondicionamiento, como se ha mencionado anteriormente, no se han analizado tan detalladamente como las de limpieza o inspección. Aun así, para facilitar la implementación de una nueva tecnología de esta fase, se ha realizado la Tabla 11, el cual reúne las tecnologías de reacondicionamiento más comunes. La tabla, está diseñada para descartar aquellas tecnologías que no son compatibles con el material a procesar. Donde el color verde significa que es posible utilizar la tecnología en ese material sin ningún problema. El naranja puede significar dos cosas: que es complicado utilizar esa tecnología con ese material o que es necesario analizar cada caso por separado, como ocurre con los otros materiales no férricos. Las casillas que aparecen en rojo, significan que es muy difícil utilizar esa tecnología con ese material. Por último, están las casillas que están ralladas. Estas casillas, significa que usar esa tecnología para ese material no tiene sentido.

**Tabla 11.- Compatibilidad del material con la tecnología: reacondicionamiento**

| Tecnologías             |                           | Materiales |  |             |  |           |               |              |  | Componentes electrónicos |  |
|-------------------------|---------------------------|------------|--|-------------|--|-----------|---------------|--------------|--|--------------------------|--|
|                         |                           | Metales    |  |             |  | Polímeros |               |              |  |                          |  |
|                         |                           | Férricos   |  | No férricos |  | Otros     | Termoplástico | Termoestable |  |                          |  |
| Arranque de viruta      | Torno                     |            |  |             |  |           |               |              |  |                          |  |
|                         | Fresadora                 |            |  |             |  |           |               |              |  |                          |  |
|                         | Centro de mecanizado      |            |  |             |  |           |               |              |  |                          |  |
|                         | Taladro                   |            |  |             |  |           |               |              |  |                          |  |
|                         | Mandrinado                |            |  |             |  |           |               |              |  |                          |  |
|                         | Rectificador              |            |  |             |  |           |               |              |  |                          |  |
| Conformado              | Brochado                  |            |  |             |  |           |               |              |  |                          |  |
|                         | Forja/Estampado           | Frío       |  |             |  |           |               |              |  |                          |  |
|                         | Caliente                  |            |  |             |  |           |               |              |  |                          |  |
|                         | Molde desechable          |            |  |             |  |           |               |              |  |                          |  |
|                         | Molde permanente          |            |  |             |  |           |               |              |  |                          |  |
| Transformación de chapa | Corte o cizallado         |            |  |             |  |           |               |              |  |                          |  |
|                         | Doblado                   |            |  |             |  |           |               |              |  |                          |  |
|                         | Embutición                |            |  |             |  |           |               |              |  |                          |  |
|                         | Soldar                    |            |  |             |  |           |               |              |  |                          |  |
| Aporte de material      | Proyección térmica        |            |  |             |  |           |               |              |  |                          |  |
|                         | 3D                        |            |  |             |  |           |               |              |  |                          |  |
|                         | Extrusión                 |            |  |             |  |           |               |              |  |                          |  |
| Polímeros               | Inyección                 |            |  |             |  |           |               |              |  |                          |  |
|                         | Moldeo por compresión     |            |  |             |  |           |               |              |  |                          |  |
|                         | Moldeo por bolsa de vacío |            |  |             |  |           |               |              |  |                          |  |
|                         | Moldeo por contacto       |            |  |             |  |           |               |              |  |                          |  |
| Composites              | RTM                       |            |  |             |  |           |               |              |  |                          |  |

## Aplicaciones

Una vez realizada la clasificación las tecnologías, se va diseñar el proceso de remanufactura de un rodamiento de gran tamaño y de un motor agrícola de combustión interna. Para cada producto se van a explicar las fases que componen el proceso de remanufactura y las tecnologías que se usarán para cada fase. Para ello se han usado tanto los diagramas como las tablas de la anterior fase.

## Rodamientos de gran tamaño (Kaydon, 2017)

El componente a remanufactura es un rodamiento de gran dimensión. Hay que destacar, que el hecho de remanufacturar un rodamiento de gran tamaño en lugar de uno pequeño no es coincidencia. Los pequeños rodamientos no tienen suficiente valor añadido como para remanufacturarlos; es decir, no saldría rentable.

Tabla 12.- Tabla de especificaciones: rodamientos

| Rodamientos                  |                                      |
|------------------------------|--------------------------------------|
| Componentes a remanufacturar | Aros                                 |
| Nuevos componentes           | Bolas y juntas                       |
| Suciedad principal           | Grasa y pequeñas cantidades de óxido |
| Material                     | Acero                                |



Los rodamientos, están compuestos por los aros, las bolas y las juntas. De esos componentes, solo se remanufactura los aros, ya que el reacondicionamiento que se realizará en los aros, modificará las dimensiones de los rodamientos (Tabla 12).

La suciedad principal de estos rodamientos es la grasa, que se suele aplicar en abundancia para asegurar el correcto funcionamiento. También, puede haber pequeñas cantidades de óxido (Tabla 12).

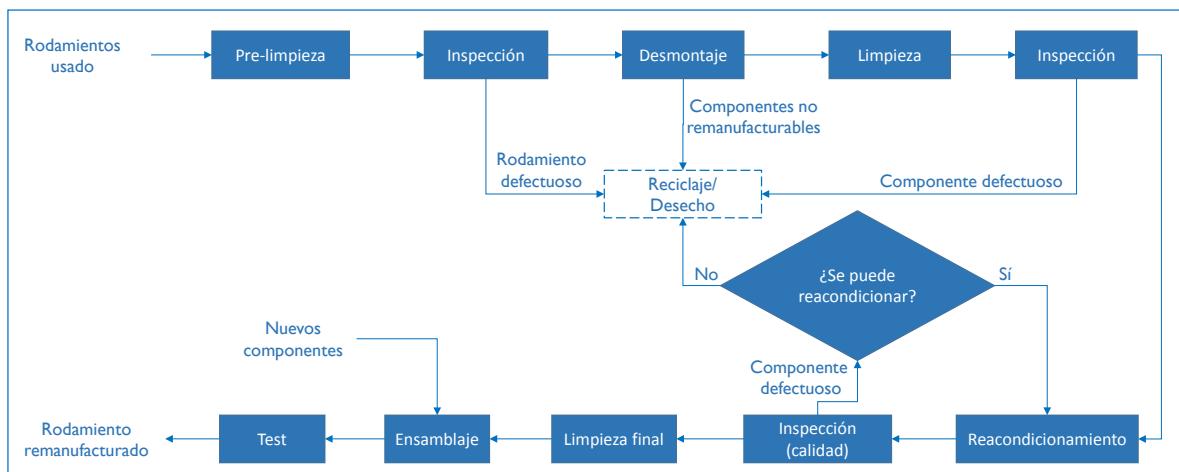


Figura 49.- Esquema general del proceso de remanufactura: rodamientos

El proceso de remanufactura (Figura 50) consta de 10 fases. La primera fase (pre-limpieza) consiste en aplicar una limpieza rápida al rodamiento, con el fin de facilitar la inspección. La primera inspección

se realiza para descartar rápidamente los componentes que tenga un defecto muy visible el cual no los permite ser remanufacturarlos. Después, se desmontan el rodamiento separando los aros de las bolas y juntas. A continuación, se limpian los aros, se inspección a fondo y se reacondicionan. Una vez llegado a este punto, se sigue el mismo proceso que el de unos rodamientos nuevos. Se hace un control de calidad de los aros, se limpian y se ensamblan todo los componentes. Finalmente, los rodamientos pasan un test para verificar el correcto funcionamiento.

### I. Pre-limpieza (Si el rodamiento está muy sucio)

Para la fase pre-limpieza se busca un método de limpieza que sea sencillo y barato, ya que el objetivo de esta fase es eliminar la suciedad que impide inspeccionar fácilmente la pieza (Figura 51). Por ello, para limpiar el exceso de grasa que pueden tener los rodamientos, con la ayuda de Tabla 9 y Tabla 8, se ha elegido la limpieza con agua a presión. Es una tecnología sencilla y apropiada para eliminar la grasa. Dicha limpieza, puede ser tanto manual como automática, dependiendo de la inversión que se quiera realizar.



Figura 50.- Rodamiento sucio con grasa

### 2. Inspección

Se hace una inspección visual, con el fin de descartar aquellos rodamientos defectuosos.

### 3. Desmontaje (Figura 52)

Puesto que no todo los componentes se van a remanufacturar, se utilizará un desmontaje semi-destructivo y destrutivo. Desmontando cuidadosamente los aros para no dañarlos, pero de la forma más sencilla los demás componentes.



Figura 51.- Aros desmontados

#### 4. Limpieza

Como se ha mencionado anteriormente, los aros contienen grasa y óxido (mayormente grasa). Por ello, se ha buscado en Tabla 9 una tecnología que elimine perfectamente la grasa, pero que también sea capaz de eliminar el óxido. Esta tecnología tendrá que ser compatible con el acero (Tabla 8). De las distintas opciones posibles, la más adecuada para este caso, es la limpieza automática mediante agua a alta presión. El agua, estará mezclado con alguna solución de limpieza para mejorar la eficiencia del proceso. Puesto que no suele haber grandes cantidades de óxido, no es necesario un segundo proceso de limpieza, como puede ser una limpieza abrasiva, para eliminar dicho óxido.



Figura 52 Limpieza con agua a alta presión.

#### 5. Inspección

Se analiza cuidadosamente el aro para identificar los posibles defectos y así descartar los aros defectuosos.

- 1) Para la inspección superficial, se ha seleccionado la inspección mediante partículas magnéticas. Esta técnica, permite analizar toda la pieza fácilmente. En la Tabla 10, se puede observar que es posible realizar dicha inspección con cualquiera de las otras técnicas. Pero, al ser el aro de acero (material ferromagnético) se ha optado por esta técnica.
- 2) De las tecnologías analizadas existen dos opciones para realizar la inspección volumétrica, y las dos son posibles en este caso (Tabla 10). Inspección por ultrasonidos o mediante una radiografía. La opción más cómoda y rápida sería mediante una radiografía, pero el

valor de la pieza tendría que ser mayor para justificar su uso. Por ello, se usara la inspección por ultrasonidos (Figura 54).

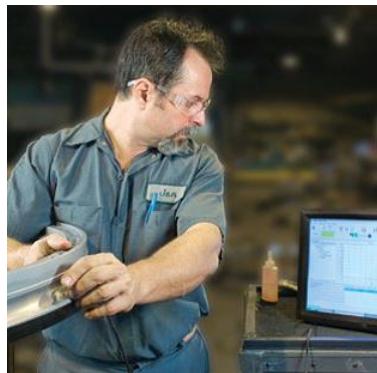


Figura 53.- Inspección del aro mediante ultrasonidos

- 3) Se analizan las durezas de la superficie para poder determinar si ha habido alguna modificación en la microestructura del aro durante su uso. Para ello, se podrá utilizar tanto el ensayo Rockwell como Brinell.
  - 4) Las dimensiones de los aros se verificarán mediante la inspección manual y la medición por contacto (aquellos puntos donde no se puedan usar las herramientas tradicionales). Se han elegido las técnicas más apropiadas para este componente, ya que no existen ninguna restricción debido al material (Tabla 10).
6. Reacondicionamiento

Una vez pasada la inspección, se les realiza un rectificado de precisión a todos los aros (Figura 55). Como los aros son de acero, se puede realizar dicha operación sin ningún tipo de problema (Tabla 11).



Figura 54.- Rectificado del aro

## 7. Inspección (calidad)

Después del proceso de reacondicionamiento, se realiza un control de calidad para verificar que los aros cumplen las características mínimas requeridas, al igual que en un proceso de manufactura.

## 8. Limpieza final

Antes de ensamblar los aros con los nuevos componentes, se limpian los aros para eliminar cualquier suciedad adherida durante el proceso de reacondicionamiento.

#### 9. Ensamblaje

Se monta los componentes del rodamiento (los aros remanufacturados y las nuevas bolas y juntas) de la misma forma que si todos los componentes fuesen nuevos (Figura 56).



Figura 55.- Ensamblaje del rodamiento

#### 10. Test

Se realiza una test que asegure el correcto funcionamiento del rodamiento.

### Motor agrícola de combustión interna (CNH Reman, 2017)

En este caso, se ha analizado el proceso de remanufactura de un motor agrícola de combustión interna. Los motores, tienen gran potencial en la industria de la remanufactura, ya que los componentes más caros se pueden remanufacturar.

La grasa o el aceite, es la suciedad principal que hay en este tipo de motores. Pero, al producirse una combustión cerca de estos componentes, es posible encontrar algún que otro sedimento carbonizado. Además, puede que el bloque motor este pintado.

Tabla 13.- Tabla de especificaciones: motor

| Motor                        |   |
|------------------------------|---|
| Componentes a remanufacturar | Bloque motor, cigüeñal, árbol de levas y bielas                     |
| Nuevos componentes           | Rodamientos, tapones y pistones                                     |
| Suciedad principal           | Grasa, aceite, sedimentos carbonizados y pintura (bloque motor)     |
| Material                     | Acero: Bloque motor, cigüeñal y árbol de levas<br>Fundición: Bielas |



Los componentes principales del motor son: el bloque motor, el cigüeñal, el árbol de levas, las bielas, los rodamientos, los tapones y los pistones. Los tres últimos componentes, no se remanufacturan, puesto que o no tienen un gran valor añadido (rodamientos y tapones) o las modificaciones que se hacen en el bloque motor durante dicho proceso, eliminando cualquier opción de remanufactura (pistones).

La grasa o el aceite, es la suciedad principal que hay en este tipo de motores. Pero, al producirse una combustión cerca de estos componentes, es posible encontrar algún que otro sedimento carbonizado. Además, puede que el bloque motor este pintado.

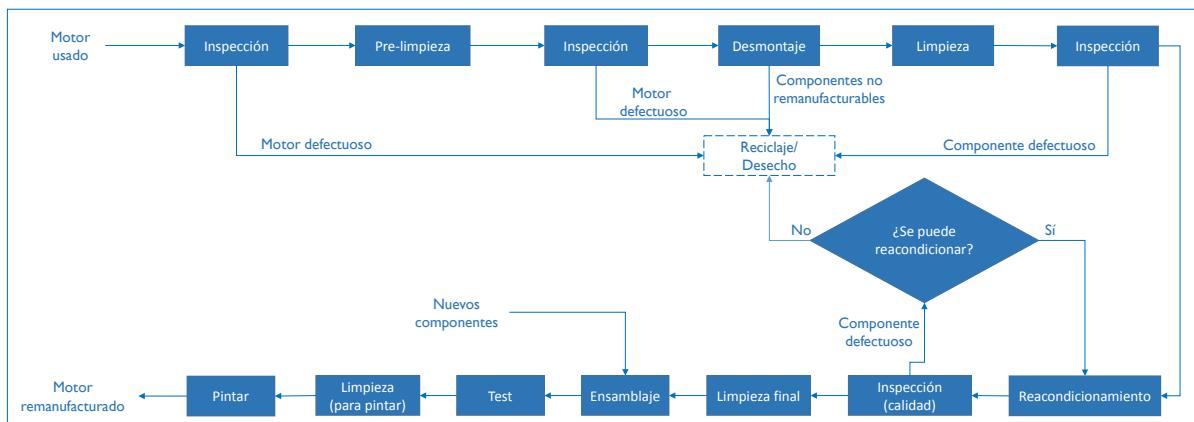


Figura 56.- Esquema general del proceso de remanufactura: motor

El proceso de remanufactura de los motores es más complejo que el de los rodamientos. Es este caso, el proceso consta de 13 fases (Figura 57). El primer paso, es hacer una inspección rápida al motor para descartar aquellos motores que no estén en condiciones para ser remanufacturados. Después, se realiza una pre-limpieza para poder inspeccionar las zonas más sucias. Una vez inspeccionado el motor en su conjunto, se desmonta y se limpian los componentes que se van a remanufacturar (bloque motor, cigüeñal, árbol de levas y bielas). Despues, se inspecciona cada

componente uno a uno para determinar si cumple las características mínimas para poder remanufacturarlo.

La siguiente fase, es la del reacondicionamiento. Al componente, se le realizan diferentes operaciones para corregir el desgaste que haya sufrido durante su ciclo de vida. Se puede decir, que esta es la última fase del proceso de remanufactura en sí, puesto que las siguientes fases, aparecen en todos los procesos de manufactura de un motor. En estas fases, se realiza un control de calidad (inspección), se limpian los componentes, se ensamblan y se someten a un test. Finalmente, se limpia el motor para poder pintarlo posteriormente.

### 1. Inspección

Se realiza una primera inspección visual para descartar los motores defectuosos.

### 2. Pre-limpieza

Se limpia el motor de una forma rápida para poder inspeccionar las zonas más sucias.

- I) Para esta fase de limpieza, se ha buscado una tecnología que sea bueno eliminando grasa y aceite, sin prestar atención a los sedimentos carbonizados. Con la ayuda de las tablas (Tabla 9 y Tabla 8), se ha deducido que la mejor opción para esta fase, es la limpieza mediante agua a presión (Figura 58). Puede ser una limpieza automática o manual, todo depende de la inversión y del nivel de producción de la empresa.



Figura 57.- Pre-limpieza del motor

### 3. Inspección

Se repite el primer paso, prestando atención a las zonas que antes tapaba la suciedad.

### 4. Desmontaje (Figura 59)

Se utilizará un desmontaje semi-destructivo y en algunos componentes destructivo. Puesto que no se van remanufacturar todos los componentes, es posible romper algunos para facilitar el proceso de desmontaje.



Figura 58.- Desmontaje del motor

## 5. Limpieza

Todas las piezas, en mayor o menor medida, tienen grasa, aceite y sedimentos carbonizados. Pero solamente el bloque motor está pintado. Por ello, es necesario aplicarle una limpieza complementaria que elimine la pintura.

- I) Siguiendo las tablas, se ha elegido la limpieza por medio de agua a alta presión con una solución de limpieza para limpiar los componentes (Figura 60). En la Tabla 9, se puede observar que es una tecnología el cual permite eliminar perfectamente la grasa y el aceite y es compatible con el acero y fundición (Tabla 8). Además, de poder eliminar la pintura y los sedimentos carbonizados. Hay que destacar, que los componentes no tienen ningún recoveco (quitando el bloque motor); por ello, de las diferentes opciones, se ha escogido la tecnología más simple y barata.



Figura 59.- Limpieza mediante agua a alta presión

- 2) Bloque motor: Para la limpieza complementaria, el cual ayudara a eliminar la pintura de la superficie, se ha elegido la limpieza térmica. Aparte de buscar una tecnología que ayudase a eliminar la pintura, al tener alguna geometría compleja que podría dificultar la limpieza por agua a alta presión, se ha buscado en la Tabla 9 una tecnología que permitiese eliminar la suciedad de esos recovecos (grasa, lubricante y algún sedimento carbonizado) y que sea compatible con el acero (Tabla 8). Dicha limpieza, irá antes que la limpieza por agua a alta presión, ya que no es capaz de eliminar toda la superficie de pintura, pero sí de ablandar y facilitar su posterior limpieza.

## 6. Inspección

Se analizan cuidadosamente los componentes para identificar los posibles defectos y así descartar los componentes defectuosos. Un componente será remanufacturado, siempre y cuando pase todas las inspecciones.

- 1) La inspección superficial es la primera inspección que se realiza. Siguiendo la Tabla 10, se puede observar que se pueden realizar todas las inspecciones, ya que todos los componentes son de acero o fundición. Aprovechando el hecho de tener que analizar un material ferromagnético, se ha elegido la inspección mediante partículas magnéticas (Figura 61). Todos los componentes se analizan mediante esta técnica.



Figura 60.- Inspección mediante partículas magnéticas: bloque motor (a), cigüeñal (b)

- 2) La biela, es el único componente que necesita una inspección volumétrica, al ser el que más tensiones soporta. De las dos posibles opciones, la más adecuada es la inspección por ultrasonidos. No es están rápida y sencilla como una radiografía, pero sí que es mucho más barata.
- 3) Se analizan las durezas de la superficie para poder determinar si ha habido alguna modificación en la microestructura durante su uso. Para ello, se podrá utilizar tanto el ensayo Rockwell como Brinell.
- 4) Por último, a todos los componentes, se les realiza una inspección dimensional. Siguiendo la Tabla 10, se puede ver que todas las técnicas de medición son posibles. Por eso, se ha seleccionado el más idóneo para cada caso.
  - i. Bloque motor: Se realiza una inspección óptica manual. Se mide el diámetro y el alineamiento de los agujeros.
  - ii. Cigüeñal y levas: Se verifican las dimensiones mediante una inspección óptica manual.
  - iii. Biela: Se medie el diámetro de los agujeros manualmente.

## 7. Reacondicionamiento

Una vez pasado todas las inspecciones, los componentes están listo para ser reacondicionados. Utilizando la Tabla 11, se ha verificado si es posible realizar la operación elegida para cada componente (material).

- 1) Bloque motor (Figura 62): La primera operación que se realiza, es un rectificado en la parte superior del bloque. Luego, se hace un fresado en los agujeros de los pistones; no necesita un gran acabado superficial, puesto que más tarde se introducirán las camisas. Por último, una vez introducidas las camisas, se realiza un bruñido.



Figura 61.- Reacondicionamiento del bloque motor: rectificado (a), fresado (b)

- 2) Cigüeñal y árbol de levas (Figura 63): A los dos componentes se les realiza las mismas operaciones. Primero se hace un rectificado y luego un micro-pulido.

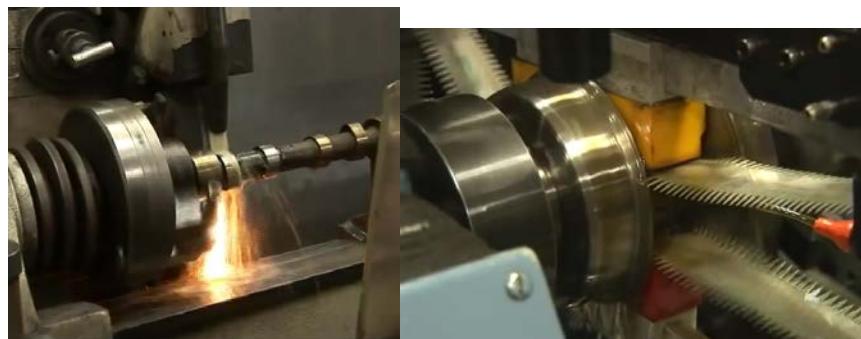


Figura 62.- Reacondicionamiento del cigüeñal y árbol de levas: rectificado del árbol de levas (a), micro-pulido del cigüeñal

- 3) Biela: El mandrinado es la única operación que se realiza a la biela (Figura 64).



Figura 63.- Operación de mandrinado en la biela

## 8. Inspección

Después del proceso de reacondicionamiento, se realiza un control de calidad para verificar que los componentes cumplen las características mínimas requeridas, al igual que en un proceso de manufactura (Figura 65).



Figura 64.- Inspección de calidad: bloque motor (a), árbol de levas (b)

#### 9. Limpieza final

Todos los componentes remanufacturados se limpian antes de montarlos. Así, se elimina cualquier suciedad que puedan tener debido a los anteriores procesos.

#### 10. Ensamblaje

Se montan todo los componentes, tanto los componentes remanufacturados como los nuevos (Figura 66). Se sigue el mismo procedimiento que a la hora de ensamblar un motor nuevo.



Figura 65.- Ensamblaje del motor: componente remanufacturado (a), componentes nuevos (b)

## 11. Test

Una vez ensamblando todo los componentes, el motor pasa un último test que verifique el correcto funcionamiento de este (Figura 67).



Figura 66.- Testeando el motor.

## 12. Limpieza antes de pintar

Antes de pintar, puede ser necesario limpiar el motor para poder pintarlo correctamente.

## 13. Pintar

El último paso, es pintar el motor (Figura 68). Con ello, se da por terminado el proceso de remanufactura.



Figura 67.- Proceso de pintado (motor)

## Bibliografía y referencias

1. <http://www.durr-ecoclean.com/products/cleaning-media/aqueous-cleaning/> [consulta: 16/12/2016]
2. <http://pprc.org/> [consulta: 13/12/2016]
3. <http://www.cleantool.org/?lang=en> [consulta: 13/12/2016]
4. Barbara Kanegsberg, Edward Kanegsberg "Handbook for Critical Cleaning: Cleaning Agents and Systems", CRC Press, Estados Unidos, 2011, vol. 27
5. Weiwei Liu, Xiaochuan Qing, Mingzheng Li, Lihong Liu, Hongchao Zhang "Supercritical CO<sub>2</sub> cleaning of carbonaceous deposits on diesel engine valve" *Procedia CIRP*, 2015, vol. 29 828-832
6. Mingzheng Li, Weiwei Liu, Tim Short, Xiaochuan Qing, Yazhou Dong, Yanming He, Hong-Chao Zhang, "Pre-treatment of remanufacturing cleaning by use of supercritical CO<sub>2</sub> in comparison with thermal cleaning" *Clean Techn Environ Policy*, 2015, vol. 17 1563–1572
7. Wei-wei Liu, Ming-zheng Li, Tim Short, Xiao-chuan Qing, Yan-ming He, Yan-zeng Li, Li-hong Liu, Heng Zhang, Hong-chao Zhang "Supercritical carbon dioxide cleaning of metal parts for remanufacturing industry" *Journal of Cleaner Production*, 2015, vol. 93 339-346
8. David SI Liebl "Industrial Cleaning Source Book", University of Wisconsin, Estados Unidos, 1993
9. WeiWei Liu, Bin Zhang, Ming Zheng Li, Yanzeng Li, Hong-Chao Zhang "Study on Remanufacturing Cleaning Technology in Mechanical Equipment Remanufacturing Process" *20th CIRP International Conference on Life Cycle Engineering*, 2013
10. Penghui Duan, Wenhui Yue, Yongxing Zhu, Jianxin Weng "Remanufacturing Cleaning Technology and Its Application in Concrete Pump Truck" *Trans Tech Publications*, 2014, Vol. 579-580 398-404
11. Rusheng LU, Bin XU, Heting HUANG, Guosheng ZHANG, Zhixin WU "Application of Cleaning Technology in the Remanufacturing for Loader's Axles and Transmission Box components" *Trans Tech Publications*, 2013, Vol. 397-400 25-28
12. Timothy J. Mason "Ultrasonic cleaning: An historical perspective" *Ultrasonics Sonochemistry*, 2016, vol. 29 519–523
13. Robert V. Fox, Lauren Roberts, Frank C. DeLucia, Jr, Andrzej W. Mizolek, Andrew I. Whitehouse "A Novel Laser-Based Approach for Cleaning Contaminated Metallic Surfaces Coupled with Rapid Residue Analysis" *Proc. of SPIE*, 2013
14. William M. Steen, Jyotirmoy Mazumder "Laser Material Processing" Springer, Reino Unido, 2010
15. Angel Arrieta, Marco Arrighi, Lennart Fredriksson, Martin Gram, Jean-Pierre Larue, Hartmut Öhmen, Mila Patel, Alan Ross, Geoff Stebbing "CLEANING OF EQUIPMENT FOR OXYGEN SERVICE" EIGA, 2006, Bélgica
16. <http://www.clemco.es/catalogo-de-productos/> [consulta: 05/12/2016]
17. <http://snowwhiteservices.com/> [consulta: 05/12/2016]
18. <https://www.armex.com/case-studies/contained/tsr13-b121> [consulta: 05/12/2016]
19. Supachai Vongbunyong, Wei Hua Chen "Disassembly Automation" Springer, 2015
20. Serope Kalpakjian, Steven R. Schmid "Manufactura, Inginería y Tecnología" Pearson Educación, 2015, México
21. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY "Non-destructive Testing: A Guidebook for Industrial Management and Quality Control Personnel" IAEA, Austria, 1999
22. Reinhart Poprawe "Tailored Light 2, Laser Application Technology" Springer, Alemania, 2011
23. <http://www.caddyspain.com/escaneado-3d-en-la-industria/escaneado-3d-para-la-automocion/> [consulta: 22/02/2017]
24. [http://www.radio-electronics.com/info/t\\_and\\_m/ate/ict-in-circuit-test-tutorial.php](http://www.radio-electronics.com/info/t_and_m/ate/ict-in-circuit-test-tutorial.php) [consulta: 03/02/2017]

25. [http://www.kaydonbearings.com/remanufacturing\\_process.htm](http://www.kaydonbearings.com/remanufacturing_process.htm) [consulta: 01/02/2017]
26. <http://whyreman.com/case-ih/reman-products/engines-1-owner/> [consulta: 21/02/2017]
27. Alan Treat, Vincent Honnold, Jeremy Wise “Remanufactured Goods: An Overview of the U.S. and Global Industries, Markets and Trade” *USITC Publication*, Estados Unidos, 2013
28. Erik Sundin “Product and Process Design for Successful Remanufacturing” *Division of Production Systems Department of Mechanical Engineering Linköpings Universitet*, Suecia, 2014