



Trabajo Fin de Grado en Ingeniería Química Industrial

Gestión y Reducción de Residuos Sólidos en la Industria del Automóvil

ÍNDICE

RESUMEN	3
INTRODUCCIÓN	4
Residuos en la industria del mecanizado	5
Marco Normativo	24
Tipos de fluidos de corte	25
Fluidos de corte acuosos	35
Fluidos de corte con base de aceite	41
Factores físico-químicos de los líquidos de corte	43
OBJETIVOS	49
DISCUSIÓN DE RESULTADOS	50
Técnicas de reciclaje	50
Técnicas de depuración	67
Técnicas de aplicación	83
Aceites renovables y biodegradables	88
Fluido de corte a partir de aceite de microalgas	92
CONCLUSIONES	95
BIBLIOGRAFÍA	100

RESUMEN

En este proyecto se realiza un estudio bibliográfico sobre todas las posibilidades de reducir la contaminación generada por los aceites de corte, un residuo muy peligroso generado en las industrias de mecanizado.

En primer lugar, se justifica la importancia de eliminar este residuo frente a todos los que se generan. En segundo lugar, se resume todas las técnicas de reciclaje y depuración existentes. Y además, se propone la sustitución de estos aceites tan contaminantes por otros más biodegradables y más respetuosos con el medio ambiente.

PALABRAS CLAVE

Aceites de corte, refrigerante, lubricante, técnica “Lubricación por cantidades mínimas” (MQL), aceites biodegradables, oxidación húmeda y oxidación en agua supercrítica.

ABSTRACT

This project is about a bibliographic study from the possibilities of reducing pollution generated by cutting oil. This oil is an hazardous waste generated in industries machining.

Firstly, this document will explain satisfactorily the importance of removing this residue against all generated. Secondly, there is a summary about all existing recycling techniques and debugging. Also, there will be a proposal about replacing these oils such pollutants for more biodegradable and environmentally friendly.

KEYWORDS

Cutting oils, refrigerant, lubricant, “Minimal Quantity Lubrication” (MQL), biodegradable oils, wet oxidation and supercritical water oxidation.

INTRODUCCIÓN

El sector del mecanizado es un sector industrial muy presente en la economía de nuestro país, con un elevado impacto social, económico y ambiental.

En el panorama industrial actual, los sistemas de fabricación se centran en obtener productos de gran calidad con unos costes y tiempos de producción adecuados a la demanda. Para alcanzar los niveles de mejora deseados, se encuentran en constante evolución y de entre todos los procesos de fabricación, los procesos de conformado por eliminación de material, usualmente conocidos como procesos de mecanizado, son los que más están evolucionando en la actualidad, debido a su versatilidad y amplia utilización.

En este sector de la industria se utiliza con frecuencia grandes cantidades de metales ferrosos. Durante la fase de fabricación, estos metales se someten a estos procesos de eliminación de material bien a través de torneado, fresado, rectificado, etc. para obtener el producto final. Los desechos se generan a partir del proceso de mecanizado en forma de efluentes residuales, residuos sólidos, emisiones atmosféricas, y emisión de energía. Si estos residuos no se reciclan o no se tratan adecuadamente antes de su eliminación, tendrán un impacto perjudicial sobre el medio ambiente a través del aire, el agua y la contaminación del suelo.

De entre todos los residuos mencionados más adelante, los aceites de corte son los que presentan un mayor riesgo para el medioambiente, debido a que son altamente contaminantes. Se trata de un producto compuesto por agua y aceites que se utiliza como lubricante y refrigerante en los procesos de mecanizado por arranque de viruta.

Residuos en la industria del mecanizado

A continuación se presentan todos los residuos provenientes de los procesos de mecanizado.

1. Virutas y lodos metálicos

Se componen del material excedente obtenido durante el procesado de las piezas. Se presentan convencionalmente en forma de virutas y lodos metálicos que contienen un grado de impregnación en fluido de corte y dependiendo de esta impregnación serán clasificados en residuos peligrosos o residuos inertes.

1.1 Virutas

Son el material excedente en los procesos de mecanizado que emplean herramientas de geometría definida. Su formación y estructura son objeto de estudio ya que aportan información referente a la ejecución de las operaciones. Van acompañadas de una cantidad variable de fluido de corte que impregna su superficie o que es arrastrado en los intersticios de su estructura.

La viruta formada depende del material tratado y existen tres tipos:

- Viruta de fundición: Son virutas metálicas que presentan gran facilidad para sedimentar debido a su elevado peso específico.
- Viruta de acero: Este tipo de virutas tiende a amontonarse y formar “bolas” de mayor tamaño al presentar un aspecto más rizado que el anterior. Este residuo puede llegar a taponar las conducciones por donde se distribuye el líquido de corte.
- Viruta de aluminio: Ésta última tiende a flotar sobre el líquido de corte al tener menos peso específico.

1.2 Lodos metálicos

Se generan en los procesos de mecanizado que emplean herramientas de geometría no definida (por ejemplo el rectificado). Su composición es una mezcla variable de pequeñas partículas metálicas arrancadas de la pieza, fluido de corte y material abrasivo. Se estima que en EE.UU. se produjo cantidades de lodos de hasta 22 000 toneladas en 1 983 y en la actualidad se cree que estas cantidades son mucho más altas. Estos lodos presentan desafíos especiales debido a que el proceso implica una gran variación de pH, metales pesados tóxicos, fosfatos, disolventes, etc.

Sin embargo las virutas pueden ser separadas en centrales de filtración donde los lodos metálicos se separan en virutas y líquidos de corte.

En las centrales de filtración el líquido de corte que contiene las virutas metálicas es conducido desde la herramienta hasta la central mediante un sistema de canales, por medio de la gravedad o por un sistema de bombeo propio. Una vez en la central, el fluido pasa a través de distintos filtros de rejillas metálicas donde hay unas dragas que barren las virutas acumuladas y las conducen hacia un contenedor para su posterior secado, distribución y venta.

El secado de las virutas retenidas se realiza mediante una centrífuga de virutas para cumplir con las especificaciones en porcentaje de humedad del cliente final. Al poder vender este residuo se consigue revalorizar lo que en principio es un residuo.

El líquido de corte filtrado se almacena y se recircula a la línea de producción para volver a ser utilizado en el proceso de mecanizado. Para mantener la concentración del líquido de corte así como sus propiedades se adiciona, periódicamente, líquido de corte nuevo y agua (industrial o desmineralizada) a la conducción por donde retorna a la herramienta de corte.

2. Otros residuos

Se generan básicamente por los restos de los útiles de corte y de mecanizado así como restos de piezas, chatarras, útiles de limpieza y equipos contaminados. Estos residuos pueden ser catalogados como residuos peligrosos o inertes dependiendo de su contaminación en residuos peligrosos provenientes de los fluidos de corte.

2.1 Útiles de corte

Se generan cuando la vida útil de la herramienta llega a su fin. Se utilizan para modificar formas, dimensiones y el grado de acabado superficial de las piezas. Son básicamente desechos de acero de herramientas, carburos metálicos, metales duros, etc. Cuando pasan a ser residuos se deben sustituir por útiles de corte nuevos y se vendería a empresas de reciclaje, obteniendo así un beneficio.

2.2 Chatarra

Proveniente de piezas defectuosas, sobrantes de material y material defectuoso. Igualmente, es un residuo fácil de revalorizar ya que puede venderse en chatarrerías.

2.3 Útiles de limpieza y equipos contaminados

Son los empleados en la limpieza de los operarios y las piezas como pueden ser papeles, trapos, etc. Estos residuos pueden ser reciclados y no suelen presentar muchos problemas para el medio ambiente comparado con el resto de residuos.

2.4 Filtros

Proceden básicamente de sistemas de mantenimiento del fluido de corte y de filtros de sistemas de aspiración localizada llamado también “antinieblas”.

En el primer caso, los filtros contienen lodos abrasivos y pequeñas virutas retenidas, además de estar completamente empapados por el fluido de corte.

Los filtros “antinieblas” están moderadamente contaminados con los contaminantes que han sido aspirados. Estos filtros son de vital importancia para evitar que ciertas emisiones acaben inhaladas por el trabajador. Las posibles emisiones inhaladas por un trabajador pueden ser las siguientes:

- Neblina de aceite / Aerosol: se produce por la interacción del fluido con las partes móviles, que produce salpicaduras y se dispersan como finas gotas, tan pequeñas que se quedan flotando en el aire.
- Humo de refrigerante: Si un fluido refrigerante comienza a calentarse excesivamente puede empezar a quemarse y a degradarse.
- Vapores / Fase de gas: Según el tipo de refrigerante que se utilice, se puede producir más o menos neblina o humo. En la siguiente tabla se recoge el % de neblina y de humo que puede producir los distintos aceites de corte:

Tabla 1. Cantidad de humo y neblina generada por distintos aceites de corte.

Tipo de refrigerante	Humo	Neblina
Aceites de corte mineral	70%	30%
Emulsiones en base de agua	10%	90%
Aceites de base sintética	30%	70%
Aceite vegetal	20%	80%

Su inhalación puede provocar afecciones en las personas y al medio ambiente. Dichas partículas pueden incorporarse a cauces fluviales o filtrarse en suelos agrícolas por lo que pueden modificar ecosistemas. Algunos gases tóxicos intervienen en el proceso de formación de lluvia ácida y en el smog fotoquímico (es la contaminación originada de la combinación del aire con contaminantes durante un largo período de altas presiones, lo que provoca el estancamiento del aire, y la

permanencia de los contaminantes en las capas más bajas de la atmósfera debido a su mayor densidad).

Por tanto, es importante tener una buena captación y filtración de los gases y realizar un buen mantenimiento de los filtros. La vida de los filtros varía en función de las aplicaciones, de la composición de la neblina y de la carga que soporta el filtro. Estos filtros al estar en contacto con los aceites y contener, una pequeña cantidad de este elemento, se convierte en un residuo con alto potencial contaminante que debe ser recogido, transportado y eliminado adecuadamente. Los pasos a seguir son:

- Realizar una correcta sustitución del filtro de aceite y su drenado.
- Posteriormente, almacenar en un contenedor específico hasta que se contacte con un gestor autorizado de estos residuos para su recogida y traslado al punto de tratamiento y/o eliminación.

2.5 Aguas residuales

El vertido de aguas residuales es el aspecto medioambiental menos significativo pero no por ello se debe obviar. Los distintos tipos de aguas residuales son los siguientes:

- Aguas de proceso

Proceden de los procesos de mecanizado y pueden ser vertidos con un previo tratamiento para cumplir los límites de vertido vigentes. O se gestiona como residuo peligroso a través de un gestor autorizado.
- Aguas de refrigeración

Proceden de los circuitos de refrigeración. Cuando se trabaja en circuito abierto se pueden verter directamente al no contener ningún contaminante más que la temperatura. Cuando se trabaja en circuito cerrado, el vertido lo forman las purgas. Las purgas sí pueden

presentar algún problema de contaminación debido a los reactivos que se adicionan al agua para prevenir la corrosión, incrustaciones y contaminación bacteriana.

- Aguas de limpieza

Este residuo se genera en el empleo de agua durante la limpieza de las áreas afectadas por fugas, salpicaduras y máquinas. El agua empleada en la limpieza de maquinaria, superficies, materiales, etc., la usada en los equipos de refrigeración o la que procede de los baños de lavados de piezas, son corrientes residuales, caracterizadas por contener aceites, agentes desengrasantes o sólidos en suspensión entre otros contaminantes. La cantidad que se consume es importante, por lo que se debe insistir en la concienciación empresarial, con el objetivo de ahorrar por el medio ambiente además del ahorro económico que supone. Este tipo de residuos pueden tratarlas las propias empresas con equipos de tratamiento y depuración de aguas residuales para su reutilización o bien se transportan a depuradoras de aguas residuales fuera de la propia empresa.

También son considerados residuos los restos de los EPIS (Equipos de protección individual), una vez finalizada su vida útil recibiendo el mismo trato que el resto de residuos con lo dispuesto anteriormente.

2.6 Embalajes

Para valorizar los embalajes es necesario identificar y clasificar previamente los residuos, ya que cada uno de ellos sigue una técnica distinta de tratamiento. Los principales grupos de embalajes son:

- Papel y cartón. Para este tipo de embalajes es posible dos tipos de valorización. Por una parte, la recuperación del material mediante su trituración y mezcla con agua formando una pasta

que a través de diversos tratamientos adquiere las características requeridas, y por otra, la recuperación energética, derivada de su elevado poder calorífico. Esta última técnica suele utilizarse para embalajes sucios.

- Plástico. Los embalajes de plástico se encuentran en forma de bidones o contenedores y fundas de plástico. Los primeros son reciclados cuando están limpios y son de tamaño elevado (normalmente >30 L). Los pequeños son incinerados para recuperar su importante poder calorífico. Las fundas plásticas son lavadas y trituradas para obtener granulados reutilizables en las industrias de transformación.
- Metales. Los embalajes metálicos, principalmente contenedores, pueden reacondicionarse mediante limpieza y eliminación de los agentes tóxicos. En caso de que estén degradados y no sea posible eliminar los productos contenidos, suelen incinerarse antes de valorizarlos como metales.
- Vidrio. A los envases de vidrio se les aplica la técnica de valorización del vidrio tras su limpieza y eliminación de agentes tóxicos.
- Cajas y palets de madera. Suelen ser revendidas cuando están en buen estado, siendo reconstruidas cuando están poco dañadas y destruidas cuando es posible su reconstrucción.

3. Residuos de fluidos de corte agotado

Los fluidos de corte son productos de composición más o menos compleja, que se adicionan en el sistema pieza-herramienta-viruta de una operación de mecanizado. Juegan un papel vital en cualquier operación

de corte de metal. La selección es importante con el fin de mantener una mejor vida de la herramienta, disminuir la fuerza de corte, menor consumo de energía, conseguir alta precisión de mecanizado y un mejor acabado superficial.

En estos fluidos el aceite sólo sirve de simple base para unir una serie de aditivos. Estos aditivos son los verdaderamente eficaces ante el trabajo de una máquina o mecanizado determinado.

Las condiciones que deben reunir los fluidos de corte en general según el “Standard Handbook of Lubrication Engineering” son los siguientes:

- Calor específico lo más elevado posible.
- Emulsión estable en agua.
- Índice de vaporización elevado.
- Poseer un buen poder de detergencia o dispersión.
- Que se pueda manipular cómodamente con la solución madre o aceite de corte.
- Que posea una conductividad térmica muy alta.
- Que el poder de protección bacteriana sea alto.

Los residuos de fluido de corte agotado según la composición, pueden ser clasificados en residuos de fluido de corte acuoso y de aceite de corte, ambos clasificados como residuos peligrosos. Los residuos de fluido de corte se transforman en residuos cuando su naturaleza física y química se degrada de tal manera que no pueden cumplir las funciones básicas: lubricar, refrigerar y limpiar el área de mecanizado.

3.1 Residuos de corte acuoso

Debido a su naturaleza orgánica dispersa en medio acuoso, la acción bacteriana se considera como la principal causa de degradación del fluido. Las bacterias anaeróbicas se reproducen rápidamente en este medio, estando su crecimiento favorecido por

la presencia de partículas sólidas y aceites. Otro factor es la fatiga que el fluido soporta durante el proceso de mecanizado.

Los principales riesgos medioambientales asociados a la generación y gestión de estos residuos, están directamente relacionados con su naturaleza, ya que se dispersan en cualquier entorno acuoso. Este factor, facilita la transmisión a este medio de todos los elementos contaminantes presentes en su composición: aceites, metales pesados, etc.

3.2 Residuos de aceite de corte

Este tipo de productos no presentan solubilidad en medio acuoso. Sin embargo, aún presentan un alto potencial nocivo. Parte de sus contaminantes pueden solubilizarse en agua cuando se produce un contacto prolongado y en medio acuoso dificultan la oxigenación del agua al ubicarse en la parte superior del fluido.

El dispositivo que elimina los materiales en exceso a través del contacto mecánico directo se conoce como una herramienta de corte. La máquina que proporciona el movimiento necesario entre la pieza de trabajo y la herramienta de corte se conoce como la máquina herramienta. Este movimiento pieza-herramienta durante el mecanizado provoca una extensa deformación plástica. Durante tal deformación plástica, casi el 99% de la energía alimentada a la máquina herramienta se convierte en calor. La temperatura aumenta con la velocidad y la fuerza disminuye, lo que lleva al desgaste de la herramienta más rápido. Debido a esto, es necesario enfriar la superficie entre la pieza de trabajo y la herramienta de corte. Los aceites de corte consiguen reducir satisfactoriamente esta temperatura, siendo esta la principal razón de su uso ya que así, se consigue aumentar la vida útil de la herramienta de corte. La duración del útil de corte es un factor que influye de manera decisiva en la mecanización de la pieza, ya que si ésta se vuelve inservible con rapidez, la operación mecánica es mala bajo todos los aspectos. Además eliminan

virutas de la zona de corte y lubrican la interfaz de la herramienta de trabajo.

En la figura se expresa gráficamente las direcciones más adecuadas en el que el fluido debe incidir durante la operación para que sea su acción positiva.

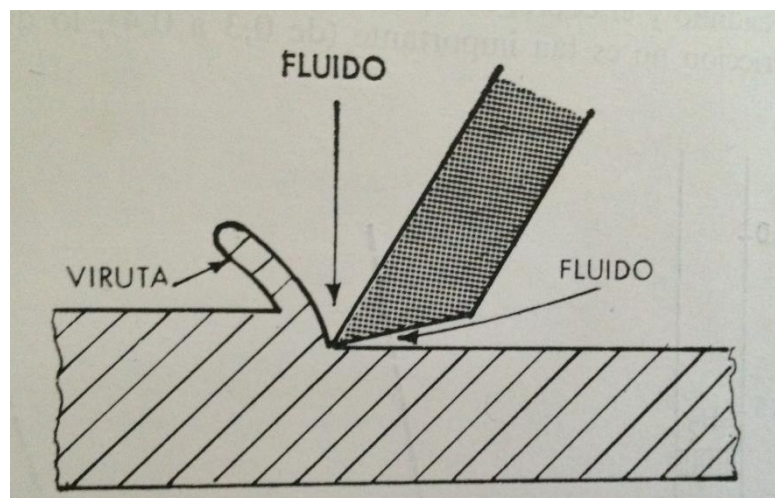


Figura 1. Representación más adecuada de la incidencia del fluido durante la operación.

Como se muestra en la figura 1, para que el rendimiento de un trabajo sea bueno, es necesario que el fluido envuelva perfectamente el área de deformación plástica, para lo cual es de bastante importancia la dirección de este fluido.

Por tanto de forma resumida las funciones de los aceites de corte son:

a) Lubricación

Es necesario lubricar para disminuir la fricción entre la herramienta y la pieza y entre la herramienta y la viruta que está siendo eliminada.

El coeficiente de fricción “cf” relaciona la fuerza “F” que se aplica a una masa “m”:

$$cf = \frac{F}{m}$$

Por lo tanto se necesitará menos fuerza para deslizar un peso cuanto más bajo sea el coeficiente de fricción. Una película de fluido de corte entre ambas partes disminuye el esfuerzo de corte.

b) Refrigeración

En cualquier operación mecánica, para arrancar viruta de un metal por medio de una herramienta de determinada dureza, es necesario consumir una cantidad de energía. De esta energía, un 98% se convierte en calor que, hace decrecer la dureza tanto de la herramienta de corte como de la pieza que se está mecanizando.

Este calor desarrollado puede provenir de las siguientes causas:

- De la energía procedente de la deformación plástica. Es el causante de la mayor cantidad de calor.
- La formación de viruta: el calor que se genera por fricción interna al deformarse y romper el material en virutas.
- La fricción de la viruta con la herramienta: el calor generado por el rozamiento entre la viruta y la herramienta.
- La fricción pieza-herramienta: el calor se produce por fricción externa al rozar la cara de incidencia de la herramienta con la pieza metálica.

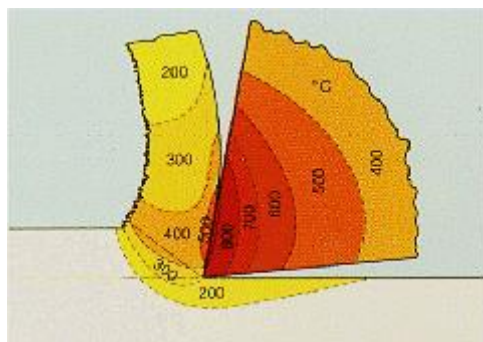


Figura 2. Gradiente de temperaturas entre pieza y herramienta. Chasco A.J.E. (2012)

Como indica la Figura 2 se puede llegar hasta alcanzar 800°C en determinadas zonas próximas al contacto entre la pieza y la herramienta. El fluido debe eliminar el elevado calor desprendido que se produce en la operación de mecanizado. Para ello debe tener:

- Calor específico alto para evacuar una cantidad mayor de calor.
- Gran poder humectante para humedecer la superficie a cortar. Así, se disminuiría la fricción entre el conjunto pieza-herramienta y por tanto disminuiría el calor.
- Baja viscosidad para garantizar un reparto homogéneo entre la pieza y la herramienta alcanzando así, una alta refrigeración de dicho sistema.

Si no se evacúa rápidamente el calor, se puede producir una elevación de la temperatura de la herramienta. Esto produciría un desgaste muy rápido de la herramienta y se conseguiría un acabado superficial deficiente de la pieza mecanizada.

c) Eliminación de viruta

La viruta arrancada por la herramienta, debido al calor generado, se suelda a ella muy cerca del filo cortante. De esta manera, se suelen acumular virutas metálicas en esta zona y además, acaban llevando a cabo el corte del metal, constituyendo lo que se denomina falso filo o falsa cuchilla. En la figura 4 se muestra el falso filo.

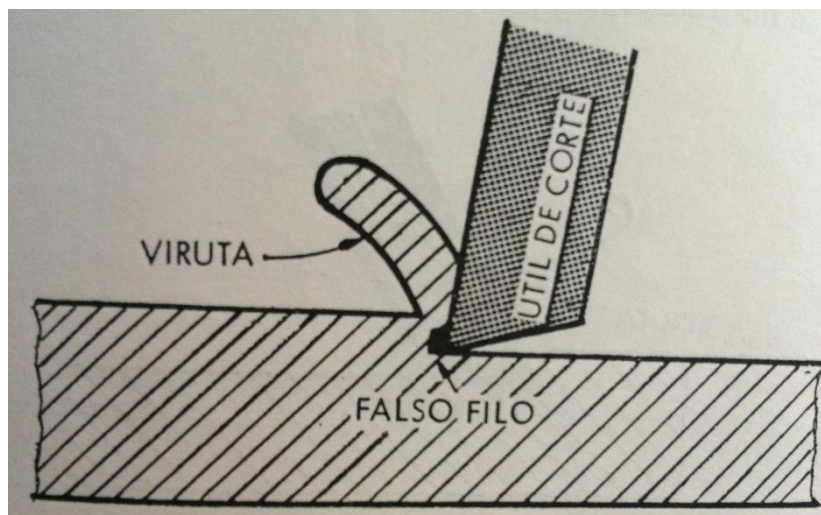


Figura 3. Falso filo o falsa cuchilla de la herramienta.

El fluido debe retirar eficientemente la viruta lejos de la zona de operación para que no interfiera en el proceso, es decir, controlar el crecimiento excesivo del falso filo y permitir una buena calidad superficial.

d) Protección frente a la corrosión

La corrosión es la degradación de un material en el medio que lo rodea.

En la figura 5 se ve claramente cómo el hierro se combina espontáneamente con el oxígeno formando óxidos.

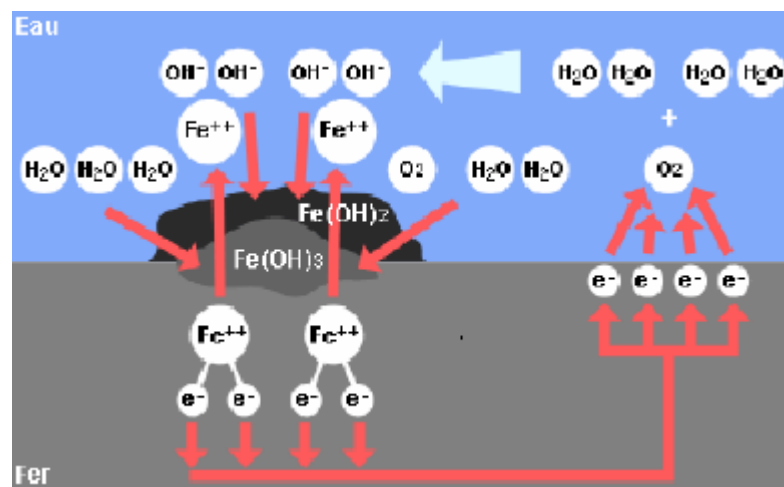
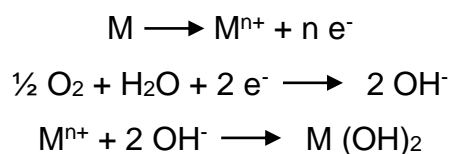


Figura 4. Corrosión de un metal. Chasco A.J.E. (2012).

Las reacciones químicas que suceden serían las siguientes:



El fluido acuoso podría oxidar y corroer la pieza, la herramienta o la máquina. Para evitarlo las formulaciones de los fluidos de corte incorporan protectores frente a la corrosión. Estos aditivos son sustancias polares: jabones de aminas, ácidos policarboxílicos, sulfonatos, etc. Estas sustancias forman una película superficial sobre la pieza que se va a mecanizar y así evitar el contacto de ésta con el oxígeno.

Con todas estas funciones los fluidos de corte consiguen:

- Disminuir la deformación plástica de la herramienta. En todo mecanizado, sea cual sea la dureza de la pieza, al arrancar la viruta se produce una deformación plástica o reblandecimiento. Este reblandecimiento agrava el problema térmico aún más.
- Mejorar la calidad del proceso de mecanizado al mejorar el acabado superficial de la pieza y el rendimiento del proceso.
- Ahorrar económicamente al alargar la vida útil de las herramientas.

3.3 Impacto de los fluidos de corte

Los residuos industriales provenientes del mecanizado son de variada procedencia y aunque el volumen generado es bajo, los riesgos de contaminación son altos si no se tratan correctamente y como establece la legislación. “El uso anual mundial se estima que sea superior a 2×10^9 l y los residuos podrían ser de 10 veces más a la del uso” (Cheng C., Phipps D.). Cuando no se gestionan adecuadamente, pueden ser una fuente de afecciones, contaminación o problemas de mayor o menor gravedad. Además, representa el 16 - 20% del coste total de fabricación.

Con el paso del tiempo, las propiedades de los fluidos de corte van desapareciendo y no pueden ser recirculados de manera infinita. Las principales causas de este envejecimiento son:

- El stress mecánico y térmico del proceso al que se ve sometido.
Las centrales de filtración cuentan con equipos de refrigeración donde mantienen la temperatura del líquido de corte que se va a recircular a la herramienta a $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($\pm 2^{\circ}\text{C}$). Es importante mantener la temperatura porque si fueran muy elevada las consecuencias serían:

- Una excesiva evaporación del agua, lo que provocaría un aumento de la salinidad del medio y la aparición de olores por presencia de sustancias químicas en los vapores.
 - La hidrólisis de los ésteres y amidas que pueden disminuir el pH, aumentar la inestabilidad de la emulsión y la pérdida del poder lubricante.
 - Un enfriamiento deficiente o excesivo puede provocar pérdida de la tolerancia de la pieza mecanizada.
 - Entre 30-50 °C se aumentaría la actividad microbiana.
- La acumulación de una serie de contaminantes, como aceites, partículas sólidas suspendidas y microorganismos, que reducen aún más sus propiedades y rendimientos.

En ese momento el resultado final del mecanizado no es óptimo, la composición inicial ha sufrido alteraciones, aparecen olores debido a procesos de descomposición microbiológico, existe una elevada concentración de contaminantes, etc. En este instante se consideran taladrinas agotadas y se debe desechar. Tienen cualidades irritantes y tóxicas debido a que contienen metales pesados, biocidas, gérmenes nocivos y productos de descomposición de carácter maloliente y/o tóxico, nitrosaminas, compuestos de boro, etc.

Principales contaminantes que reducen la eficacia de los fluidos de corte:

- Aceites parásitos procedentes de fugas de sistemas hidráulicos.
- Partículas sólidas metálicas (virutas y lodos de rectificado).

- Microorganismos (bacterias y hongos).
- Otros contaminantes (sólidos diversos).

Toda esta combinación de agentes externos más los componentes propios de los fluidos de corte se convierten en residuos altamente contaminantes, tanto para el medio ambiente como para los propios operarios que las manejan, cuando la taladrina está agotada.

Por tanto se debe contemplar desde dos perspectivas diferentes: el medio ambiente y la salud humana.

a) Impacto ambiental

Es importante controlar y gestionar adecuadamente los aspectos ambientales, para reducir los impactos y se reducirán los costes. En consecuencia se producirá una mejora de la competitividad de las empresas. Los aspectos medio-ambientales más frecuentes en los procesos de mecanizado son:

- Las emisiones atmosféricas.
- Los vertidos al agua
- Producción de residuos.
- Ruido.
- Empleo de materias primas y recursos naturales.

El impacto ambiental de los fluidos de corte se centra fundamentalmente en la problemática que pueden plantear los siguientes problemas:

- Emisiones a la atmósfera, de productos procedentes de residuos aceitosos conteniendo cloro orgánico (lluvia ácida, deterioro de la capa de ozono, etc.). Las emisiones de estos

gases aumentan también el ya mencionado smog fotoquímico.

- Los vertidos de aguas residuales conteniendo restos de aceites que pueden contaminar un ecosistema. Y la mayor parte de los procesos utilizan estos fluidos, por tanto su consumo y su gestión son los aspectos medioambientales más relevantes. Dichos vertidos pueden alcanzar zonas de drenaje o incluso el exterior de la instalación y filtrarse al subsuelo, hacia aguas subterráneas o hacia cultivos y aguas superficiales. En caso de vertido a cauce, pueden causar una importante mortandad en la fauna piscícola debido a los numerosos componentes tóxicos que contienen, como nitritos y fenoles. Dificultan además el intercambio de oxígeno entre aire y atmósfera, contribuyendo así a la desoxigenación de las aguas con los consiguientes efectos negativos. Además, compuestos persistentes como las parafinas cloradas y los metales pesados se acumulan en organismos de consumo humano con los consiguientes riesgos para la salud.

El consumo de agua también es importante por el hecho de que es el principal constituyente de los fluidos de corte.

b) Efectos sobre la salud humana

La manipulación de aceites y taladrinas comporta básicamente tres tipos de riesgos potenciales:

- Afecciones cutáneas. Constituyen el riesgo más extendido y mejor estudiado que se deriva del uso y exposición a fluidos de corte debido a la naturaleza irritante de dichos productos, así como a la agresividad de muchos componentes de su

composición. Los fluidos de corte pueden originar las siguientes afecciones cutáneas:

- Dermatitis irritativa de contacto
- Dermatitis alérgica de contacto
- Elaiocniosis o botón de aceite
- Trastornos de pigmentación
- Tumores epidérmicos
- Lesiones producidas por abrasión mecánica
- Infecciones microbianas

No obstante, estos tipos de infecciones suele ser benigno, y desaparece en cuanto se suprime el contacto con estos productos.

- Alteraciones del tracto respiratorio. La descomposición térmica que experimentan los fluidos de corte durante el mecanizado origina la formación de aerosoles y nieblas, cuya inhalación puede ocasionar riesgos para la salud de las personas expuestas, como por ejemplo irritación de las vías respiratorias, neumonía, asma bronquial, etc.
- Cáncer. El potencial cancerígeno de los fluidos de corte reside en ciertas sustancias que pueden llevar en su composición. Entre tales sustancias destacan los hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAPs), contenidos originariamente en los aceites minerales y las N-nitrosaminas que se forman a partir de las aminas y los agentes nitrosantes presentes en algunas taladrinas. La agencia internacional para la investigación del cáncer (IARC) anuncia que los fluidos de corte que contienen estos compuestos son cancerígenos y la exposición a ello podría causar el cáncer profesional de la piel.

Se debe de tener en cuenta la presencia de carbonos aromáticos, benzopirenos, nitratos, nitritos y potencial de crecimiento bacteriano para intentar evitar en la medida de lo posible los efectos descritos anteriormente. El producto usado debe eliminarse adecuadamente como residuo peligroso, limpiar el depósito de la máquina para eliminar bacterias, evitando el uso de detergentes con nitritos que podrían ser una fuente de alimentación para las bacterias. Se debe vigilar también el pH y la aireación del sistema ya que puede favorecer la presencia de unos u otros microorganismos. Se debe controlar la presencia de nieblas y partículas en el ambiente de aceites, partículas metálicas, formaldehído, amoníaco, sulfuros de hidrógeno y fosfaminas.

Se está planteando una grave amenaza para la salud y la seguridad de los operarios, así como para el medio ambiente. Un estudio realizado por la Agencia de Seguridad y Salud Ocupacional (OSHA) revela que los efectos perjudiciales de los lubricantes convencionales, hasta la fecha, ha dado lugar a sesenta y tres peligros para la salud identificables tales como los mencionados anteriormente. El grave problema de la eliminación de estos fluidos afecta al medio ambiente y la descarga de estos fluidos no biodegradables puede afectar ampliamente el medio ambiente debido al peligro de los metales.

Las taladrinas están consideradas como residuo peligroso por la normativa europea y española. Concretamente, en este segundo caso son la ley 20/1986 y el Real Decreto 833/1988 de Residuos Tóxicos y Peligrosos las que regulan la manipulación y la gestión de estos residuos. Por todo ello, el trabajo se centrará en los tratamientos y técnicas de reciclaje del mismo, con el fin de encontrar la solución más respetuosa con el medio ambiente y el ser humano.

Marco Normativo

Antes de considerar los tipos de fluidos de corte y los distintos métodos de tratamiento, es esencial conocer los requisitos legales para entender las normas que deben cumplirse. La legislación relativa a la regulación de los lubricantes metalúrgicos se refiere no sólo a la salud y la seguridad, sino también a las preocupaciones ambientales.

En primer lugar, el nuevo régimen europeo sobre responsabilidad ambiental, transpuesto mediante la Ley 26/2007 y su Real Decreto 2090/2008, constituye uno de los cambios más relevantes en la legislación medioambiental desde que se aprobó el procedimiento de Evaluación de Impacto Ambiental en la década de los 80. Esta Ley incorpora una responsabilidad ambiental de carácter objetivo e ilimitado basado en los principios de prevención y de que “quien contamina, paga”. Las empresas cuyas actividades estén incluidas en esta ley están obligados a adoptar y a llevar a cabo las medidas de prevención y reparación de daños medioambientales y a costear los daños, cuando resulten responsables de los mismos.

La Unión Europea exige que los fabricantes y proveedores de MWF ofrezcan productos seguros y ecológicamente aceptables durante su producción y uso.

La Directiva de Agua de la Unión Europea (2000/60/CE) ha dado prioridad a las acciones para identificar sustancias con el fin de minimizar el impacto sobre el medio ambiente.

Por otra parte, la Directiva de la Unión Europea (2000/76/CE) ha abordado el problema de los residuos y ha proporcionado un marco aún más estricto destinado a reducir el efecto negativo sobre el medio ambiente. Los principales contaminantes a reducir son los óxidos de nitrógeno (NOx), dióxido de azufre (SO₂), cloruro de hidrógeno (HCL) y metales pesados. En consecuencia, esto limita la cantidad de lubricantes metalúrgicos que se puedan desechar a través de la incineración. Es necesario encontrar una opción alternativa y rentable.

El Reglamento de Residuos de Andalucía, aprobado por el Decreto 73/2012, es el que gestiona todos los tipos de residuos, tanto peligrosos como no peligrosos. Este reglamento tiene la finalidad de prevenir la generación de residuos y

fomentar la prevención, la preparación para la reutilización, el reciclado y otras formas de valorización.

Los fluidos de corte acuosos han sido catalogados como Residuo Peligroso en la Legislación Española (ley 10/1998, de 21 de abril, Básica de residuos Peligrosos).

La legislación vigente aplicable específicamente a los fluidos de corte es la siguiente:

- Directiva comunitaria 199/45/CE sobre sustancias preparadas.
- Directiva comunitaria 2001/60/CE (modificación de la anterior según la 28 ATP (Adaptación progreso Técnico). Esta directiva ha modificado sustancialmente la anterior, especificando las sustancias con peligrosidad y que se hallen presentes en concentraciones mayores al 1%.
- Directiva Comunitaria 2001/58/CE sobre la elaboración de Fichas de Seguridad (MSDS).

Tipos de fluidos de corte

Es muy importante la correcta selección del fluido de corte debido a que esto condicionará el acabado final de la pieza. Se pueden prever muchos problemas con una adecuada selección dentro de todos los tipos de fluidos de corte que hay en el mercado, explicado más adelante. Los problemas más frecuentes son:

- Degradación bacteriana: el factor de limpieza es un criterio importante ya que debido al crecimiento de las bacterias, las emulsiones contaminadas pueden causar los siguientes problemas:
 - Dañar las máquinas.

- Acortamiento de la vida de las herramientas y conseguir una peor calidad de las superficies de las piezas tratadas.
- Acortamiento de la vida del aceite, con la consiguiente repercusión económica, por el cambio obligado y frecuente de estos aceites para que siempre produzca los debidos efectos.
- Rápida corrosión de la pieza. Los inhibidores de corrosión son alterados por los microorganismos lo cual provoca la alteración de la pieza mecanizada al contacto con el oxígeno del aire.
- Puede aparecer además residuos gomosos, que se adhieren en los equipos, llegando incluso a tapar tuberías y causar un incremento considerable de las operaciones de mantenimiento de los equipos.
- Olores desagradables.
- Decoloración del aceite de corte.

Una vez contaminado el aceite de corte con estos residuos, el crecimiento de microorganismos es progresivo y de gran rapidez. En el gráfico de la figura 6 se observa el crecimiento de estos gérmenes en una emulsión.

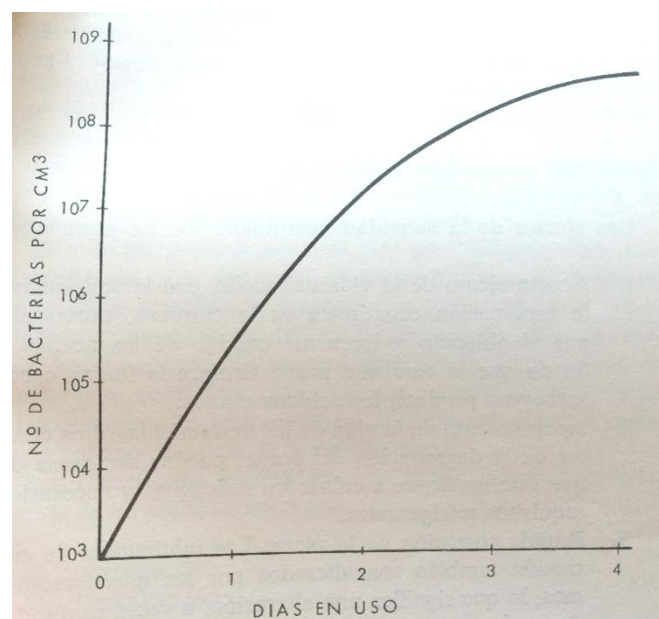


Figura 5. Crecimiento de microorganismos en una emulsión.

La microbiología de cualquier sistema dependerá de una serie de actores, como la aireación (presencia abundante de oxígeno), temperatura, pH, disponibilidad de elementos nutritivos y de la efectividad de los inhibidores.

- Corrosión y oxidación: Hay que conocer el fluido de corte que se compra y que contengan suficientes ingredientes anticorrosivos. Si no se producirían daños en el conjunto herramienta-pieza y en la máquina y sus componentes.
- Rancidez (malos olores): Los fluidos y aceites de corte tienen una vida útil determinada. Cuando se convierten en taladrinas agotadas se acumulan sustancias contaminantes externas, como aceites parásitos, mugre, partículas sólidas y bacterias.

Es importante mantener el fluido de mecanizado limpio. Para ello, hay que realizar análisis periódicos de los fluidos y proporcionar el mantenimiento de los mismos. También se deben limpiar los depósitos de fluidos refrigerantes completamente antes de cargar una mezcla nueva de aceite de corte. Esto ayudará a prevenir la rancidez.

- Nieblas y humos: Algunos tipos de aceites de corte generan nieblas, las cuales son extremadamente perjudiciales para la seguridad del operador.
- Exceso de espumas: es una propiedad indeseable que aparece cuando se agita el fluido. Los aceites minerales puros no tienden a formar espumas, sin embargo, la presencia de aceites vegetales, aceites minerales y aditivos hace que éste tenga tendencia a la formación de burbujas de aire o gas en su superficie. La cantidad que se forma depende de la composición química, de la calidad del agua utilizada y el grado de agitación del sistema.

Se distinguen dos tipos de espumas:

- La espuma estable representada en pequeñas burbujas que no se rompen fácilmente y forman una cubierta densa sobre la superficie del fluido. Esto impide ver bien la pieza y causa daños en los filtros de la máquina.
- La espuma inestable que consiste en burbujas grandes que se rompen rápidamente y raramente causan problemas en las operaciones de corte.

También causan oxidaciones y la disminución del efecto de refrigeración del aceite de corte.

Para controlar bien el nivel de espumas, se realizan mantenimientos periódicos a la bomba, la boquilla y los filtros, ya que en la mayoría de los casos los daños en estos sistemas son la causa del exceso de espuma.

La selección del fluido de corte debe basarse en los siguientes aspectos:

- Tipo de operación o mecanizado.
- Metal a cortar.
- Material de la herramienta.
- Condiciones de maquinado (velocidad de corte, alimentación, profundidad, etc.).

Quizás entre estos factores el más importante es el proceso a realizar y sus características. La operación más difícil exige mayor nivel de fluido con propiedades refrigerantes por la alta generación de calor que se produce. Entre los mecanizados más exigentes se encuentra el esmerilado, torneado, fresado y el planeado.

Los procesos de taladrado y roscado necesitan fluidos de corte especiales con mayores caudales para una correcta evacuación de la viruta.

Para muchas operaciones de alta velocidad como el torneado o fresado, el mayor beneficio se obtiene con los fluidos de corte solubles en agua, por sus características de alta refrigeración. Sin embargo, hay que tener en cuenta de que los productos con mayor proporción de agua se emplean en materiales

sencillos de maquinar y operaciones básicas donde el aumento de calor es un problema.

Para materiales donde el efecto inhibidor de los compuestos contra las bacterias y el moho de los aceites se pierden cuando se corta el material, se recomienda emplear fluidos o aceites con excelentes propiedades antibacteriales.

Por tanto, por todos los motivos mencionados, es muy importante conocer los tipos de aceites de corte que hay en el mercado actualmente y sus características para poder realizar la selección más óptima para el sistema.

Los distintos aditivos que puede encontrarse en los fluidos de corte son los siguientes:

- Aceite mineral

Las principales funciones de este aceite son:

- Lubricar, una función muy útil para el mecanizado.
- Plastificar el residuo generado.
- Buen medio de transporte de los aditivos.

Ej.: aromáticos, parafinicos y nafténicos.

- Emulgentes o tensoactivos

Los emulgentes son añadidos al líquido de corte con el fin de:

- Mezclar y homogeneizar el aceite en el agua.
- Reducir la tensión superficial del agua para mejorar el contacto de la misma con la superficie a mecanizar y eliminar la suciedad en dicha superficie.
- Disolver las grasas: por el posible problema de la formación de espumas.
- Dispersar las partículas sólidas y los pigmentos.

Ej.: Emulgentes aniónicos (jabones KOH, sulfonatos sintéticos o de petróleo). Emulgentes no-iónicos (alcoholes grasos etoxilados, ácidos grasos etoxilados).

- Aditivos untuosos (Lubricantes).

Estos aditivos se utilizan con el fin de minimizar la fricción y evitar el desgaste de las piezas.

Ej.: Sustancias grasas naturales (triglicéridos), Ésteres sintéticos, Ácidos grasos, Alcoholes grasos.

- Aditivos E.P.

Reaccionan químicamente con la superficie entre metal (pieza) y metal (herramienta), formando una película de tipo molecular y así evitando el contacto entre metales.

Ej.: Azufre, Cloro, Fósforo.

- Aditivos alcalinos

Son reacciones de ácidos débiles (benzoico, bórico, glioxílico) con bases fuertes (aminas) para mantener el pH básico (≈ 9) y garantizar una elevada capacidad conservante y anticorrosiva.

Ej.: Aminas primarias, secundarias, terciarias.

- Inhibidores de corrosión

Los aditivos antioxidantes y los inhibidores de corrosión evitan la corrosión u oxidación de la pieza mecanizada y de la máquina. Son los más usados y recomendados para los aceites minerales.

Los aditivos antioxidantes actúan de la siguiente forma:

- Ejercen una acción reductora al inicio de la oxidación, dando como resultado un retraso de la misma.
- Forman una capa protectora sobre los metales, disminuyendo la acción catalítica de los que favorecen la oxidación.

- Fijan el oxígeno e impiden que se combine con las moléculas del aceite mineral.
- Dispersan o disuelven los productos de la oxidación evitando que se aglomeren en cantidad, lo que podría impedir el funcionamiento de la máquina.

Son muchos los productos que se utilizan como aditivos antioxidantes, y normalmente son multifuncionales, es decir, se pueden usar como aditivos detergentes o de extrema presión. Pueden ser compuestos fosforados, productos sulfurados, productos fosfosulfurados, aminas derivadas del fenol y compuestos de selenio.

Los inhibidores anticorrosivos actúan de la siguiente manera:

- Forman una película protectora contra el ataque de los aceites deteriorados, cuyos aditivos antioxidantes no han podido ejercer su acción por estar fuera de su alcance. Esta misma capa, que el metal absorbe, hace que la acción catalítica quede anulada.

Muchos aditivos anticorrosivos son antioxidantes también. Suelen ser sales sódicas de ácidos sulfónicos y también ésteres de ácidos nafténicos.

- Bactericidas y fungicidas

Evitan el desarrollo de microorganismos (bacterias, hongos y levaduras). Estos aditivos deben ser comprobados para asegurar de que no poseen ninguna característica negativa sobre el producto elaborado.

Ej.: Bactericidas: Liberadores de formol (N-formal / O-formal), No liberadores de formol (Isotiazolinonas / Morfolinas).

Fungicidas: Fungicida E, BBIT e IPBC.

- Cosolventes y humectantes

Estabilizan el concentrado y la emulsión. Son compuestos con solubilidad parcial en sustancias polares y no polares.

Ej.: Glicoles y alcoholes.

- Antiespumantes

Evitan la formación de espumas y mejoran la aireación del fluido. Su acción efectiva consiste en provocar el adelgazamiento de la película de aceite que recubre la burbuja de aire hasta conseguir su rotura por medio de productos que hacen variar las tensiones superficiales e interfaciales del aceite.

Para temperaturas inferiores a los 100°C, es decir, para aquellos aceites que se aplican a temperaturas inferiores a la indicada, los antiespumantes más adecuados son el alcohol cetílico, el jabón de calcio y lanilina, y las sales de sodio de los ésteres monoalquilsulfúricos.

Para usos y aplicaciones en los que la temperatura sea superior a los 100°C se deben utilizar las siliconas.

- Agua

La calidad del agua es uno de los factores más importantes que afecta a la vida útil del fluido. La química y biología del agua tienen un gran impacto en la efectividad del enfriamiento y su acción. Ayuda a estabilizar los fluidos de corte que tienen poco contenido en aceite (semisintéticos) y permiten solubilizar los compuestos hidrofílicos (biocidas, anticorrosivos, co-solventes).

El agua mezclada con fluido de corte tiene un papel muy importante en la corrosión, ya que según sus parámetros como por ejemplo la concentración de cationes calcio (Ca^{+2}), favorecerá la corrosión del material.

En los procesos de mecanizado se utilizan dos tipos diferentes de agua (industrial o desmineralizada). En la siguiente tabla se muestra sus principales parámetros:

Tabla 2. Parámetros del agua industrial y mineralizada.

Parámetro	Tipo de agua	
	<u>Industrial</u>	<u>Mineralizada</u>
pH	7.0-9.0	5.0-7.5
TAC (%)	4-25	<1
Dureza (°F)	<30	<0,1
Cloruros (ppm)	<60	<2
Sulfatos (ppm)	<100	<1
Hierro (ppm)	<0,5	<0,1
Zinc (ppm)	<5	<0,1
Bacterias (cfu/ml)	<10000	<10000
Silicio (ppm)	<100	<10
Hidrocarburos (ppm)	<1	<0,5

Como se puede observar en la tabla, la dureza (concentración de cationes Ca^{2+}) y los cloruros (concentración de aniones Cl^{-1}) es mucho mayor en el agua industrial que en el agua desmineralizada. Para controlar la calidad del agua es necesario conocer el nivel de dureza de la misma. Por tanto, el agua industrial favorece el fenómeno de la corrosión por el intercambio iónico (oxidación debida al Cl^{-1}) y con ello la formación de jabones de calcio y de magnesio:



Los iones Ca^{2+} y Mg^{2+} que son responsables de la dureza del agua, tienden a precipitar en un medio alcalino en forma de hidróxido de calcio y carbonato de calcio e hidróxido de magnesio respectivamente. Este precipitado se deposita sobre la pieza a mecanizar. Para evitarlo, se utilizan agentes complejantes (EDTA, NTA, Gluconato, Fosfonato, Policrilato), formando complejos solubles con dichos cationes.

El agua dura (arriba de las 200 ppm de CaCO_3) puede romper algunas emulsiones, lo cual genera espumas y puede generar problemas. El agua suave (por debajo de 100 ppm de CaCO_3), crea espuma por agitación y un

ambiente propicio para las bacterias. Por lo general el agua debe estar entre 100 y 190 ppm.

Sin embargo, el agua desmineralizada presenta también algunas desventajas como las siguientes:

- Elevado coste.
- Formación de espumas en presencia de tensoactivos.
- Corrosión del acero, lo que obliga al uso de aceros inoxidable.

- Colorantes

Se trata de compuestos orgánicos no ionógenos que poseen una buena solubilidad en aceites, grasas e hidrocarburos para poder colorear estos productos. Se utilizan ya que en ocasiones es conveniente colorear los aceites por razones de presentación ante el público consumidor o por necesidades técnicas.

Los colorantes deben reunir las siguientes características:

- Solidez a la luz. Esta propiedad depende de la concentración del colorante.
- Resistencia térmica.
- Poca tendencia a la sublimación.

En la siguiente tabla se resume los compuestos más empleados según la función buscada:

Tabla 3. Compuestos más empleados según la función buscada.

Tipos de compuestos	Compuestos más empleados
Lubricantes	Aceite mineral (nafténicos, parafínicos...) Aceite vegetal / animal (aceite de colza...) Aceite sintético (glicoles...)

Emulgentes	Aniónicos (sulfonatos...) No iónicos (nonilfenoles, óxidos de etileno...)
Inhibidores de corrosión	Aminas (monoditrietanolamina) Boratos Nitritos Otros (ácido butilbenzoico...)
Humectantes / estabilizantes	Alcoholes (poliglicoles) Fosfatos (fosfatos de aminas)
Biocidas	Formoles (triacinas y precursores) Fenoles
Aditivos extrema presión (Lubricantes)	Azufrados Clorados (parafinas cloradas) Otros (grasas, aditivos fosforados...)
Antiespumantes	Siliconas (alquil-aril polisiloxanos)
Complejantes	Orgánicos (EDTA...)
Colorantes	Diversos

Todos los aditivos anteriores combinados en distintas proporciones dan lugar a los distintos fluidos de corte.

Los fluidos de corte pueden dividirse en dos tipos importantes:

Fluidos de corte acuosos

Estos fluidos de corte son casi todos solubles en agua o, por lo menos, forman emulsión con ella.

Este tipo de líquido de corte presenta las siguientes características:

- Elevada velocidad de enfriamiento.
- Bajo coste de llenados iniciales.
- Muy bajo riesgo de incendio.
- Baja formación de nieblas y humos a elevadas velocidades de corte.
- Disminución de la contaminación del ambiente de trabajo.

- Fácil limpieza de la pieza una vez mecanizada.
- Escaso consumo del fluido lubricante por arrastre, tanto en piezas como en las virutas.
- Disposición sencilla

Las posibles limitaciones son:

- Suelen contener residuos de hidrocarburos pesados
- Suelen ser afectados por el agua dura
- Bruma azul, niebla y humo.

A su vez, hay distintos tipos de líquidos de corte acuosos:

1. Sintéticos

Los fluidos de corte sintéticos no contienen mineral en su formulación, en su lugar contienen un polímero lubricante, que proporciona la lubricación necesaria para las operaciones. Los de naturaleza sintética poseen un alto contenido de tensoactivos y agentes que controlan elevadas temperaturas. Cuentan con excelentes propiedades refrigerantes y algunos también ofrecen una buena lubricación. Deben ser, ante todo, solubles en agua, poseer un antioxidante elevado y un poder detergente considerable, aunque el poder lubricante sea pequeño.

Las ventajas de este tipo de aceite son las siguientes:

- Producto extremadamente limpio, antihongos y bactericida. No generan crecimiento microbiano.
- Excelente reducción del calor.
- No se ve afectado por el agua dura.
- Baja espuma.
- No hay fugas de aceite.

- Mezcla transparente.
- Muy estables y larga duración.
- Fácil en el tratamiento de desechos.

Y sus desventajas son:

- Lubricidad física deficiente.
- Generalmente diseñados para operaciones ligeras o moderadas. Para operaciones pesadas necesitan un exceso de polímero lubricante.
- Las nieblas pueden generar corrosión en la parte superior de las máquinas o cabinas de maquinado.

2. Semi-sintéticos

Este tipo de fluido es actualmente el grupo principal que se utiliza en aplicaciones de ingeniería y que ha dado una mayor cantidad de productos químicos orgánicos presentes en las aguas residuales de MWF.

Son una combinación de fluidos químicos con aceites emulsificables en agua. Específicamente, son emulsiones que contienen el 5 - 40 % de aceite en la formulación y cuyo tamaño de la partícula del aceite varía entre 0,01 - 0,10 micras de diámetro. Poseen dos veces la cantidad de emulsificantes en la formulación respecto al aceite. Contienen aditivos químicos para mejorar las condiciones de rancidez, estabilidad en el pH e inhibidores de corrosión.

Deben tener por lo menos una parte soluble en agua y otra (mucho más pequeña) emulsionable. Debe tener un poder antioxidante elevado, un poder detergente bastante grande y un poder lubricante superior a los del subgrupo anterior.

Sus principales ventajas son:

- Buena reducción de calor
- Buena lubricidad física

- Aspecto claro y limpio
- Excelente control de la viruta
- Cuentan con buena duración
- Amplia variedad de formulaciones la cual depende de la cantidad de aceite que se encuentre en la fórmula.
- Amplio rango de materiales que se pueden maquinar, ferrosos y no ferrosos.
- Alta detergencia.
- Variedad de precios dependiendo de la cantidad de aditivos presentes.

Y sus desventajas son las siguientes:

- Puede generar espuma excesiva, debido a tener más emulsificante.
- Afectados por el agua dura.
- Tiene facilidad de captar aceite para entramparlo.
- Puede reaccionar con ciertos materiales y generar residuos o jabones insolubles.
- Pueden no tener una buena protección contra la corrosión en materiales ferrosos.

3. Emulsiones

Se trata de suspensiones de aceite en agua que se logran gracias a agentes emulsificantes y otros minerales (jabón o materiales jabonosos), los cuales rompen en partículas pequeñas el aceite y las mantienen dispersas en el agua.

Contienen aceite mineral, agua, agentes antiespumantes y biocidas, agregados para controlar el crecimiento de microorganismos, entre otros ingredientes.

Estos fluidos combinan sus propiedades de lubricación y de prevención de la formación de hongos y bacterias con las excelentes características

de enfriamiento del agua. Deben poseer un buen poder antioxidante, así como una buena capacidad de detergencia.

Gracias a sus propiedades de lubricación y enfriamiento, las emulsiones son más efectivas en operaciones de mecanizado a grandes velocidades y bajas presiones acompañadas por una generación de calor considerable. Pueden usarse en operaciones de corte de altas exigencias mientras no impliquen trabajar con materiales de difícil maquinado. Estas emulsiones pueden emplearse también prácticamente en todas las operaciones de esmerilado.

Los fabricantes distribuyen este tipo de aceites como concentrados para que el usuario los prepare mezclándolos con agua en una relación de una (1) parte de aceite en veinte (20) partes de agua. Existen una gran variedad de estos productos, adicionados con fósforo, grasa vegetal o animal o incluso aditivos EP.

A continuación, se muestra una tabla comparativa de los distintos líquidos de corte acuoso.

Tabla 4. Comparativa de los distintos fluidos de corte acuoso.

	Líquido de corte acuoso		
Propiedad	<u>Emulsionable</u>	<u>Semi-sintético</u>	<u>Sintético</u>
Cantidad aceite mineral (%)	>50	10-50	Exento (<1)
Aspecto / Tamaño partículas	Emulsión Blanco lechosa / 0,1-1 μm	Emulsión translúcida / 0,005 - 0,1 μm	Solución transparente / <0,005 μm
Factor refractómetro	1	1,2-2	2-3.5
Capacidad lubricante	Muy Buena	Buena	Baja
Estabilidad biológica	Baja	Excelente	Buena

Tratamiento residuo	DQO baja	DQO media	DQO alta
Capacidad bacteriostática	Baja-Media	Media	Excelente
Uso	Todos (especial: aluminio) Lubricante	Metales férreos	Acabado-rectificado Refrigerante

En la siguiente imagen se puede observar que cuanto mayor sea la presencia de emulgentes libres, menor será el tamaño de partícula y, por lo tanto, más estable será la emulsión. Sólo tiene como inconveniente una mayor formación de espuma.

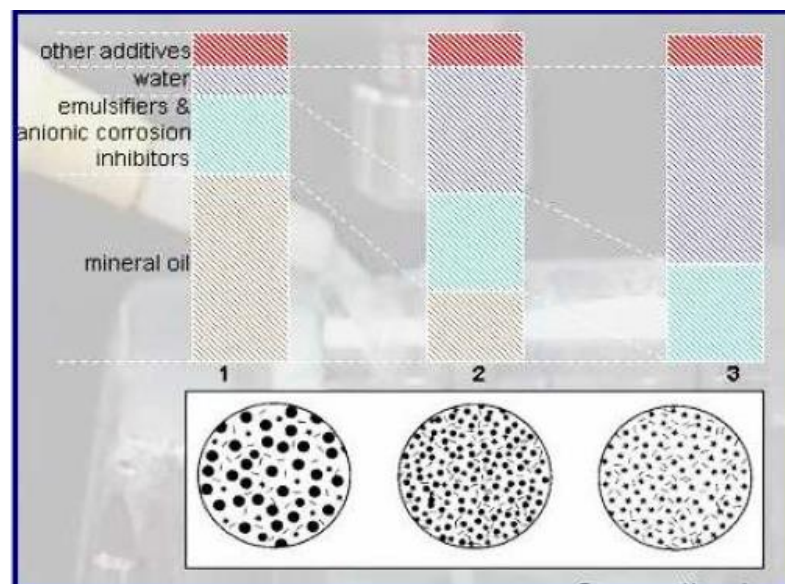


Figura 6. Distintos tamaños de las partículas de una emulsión.

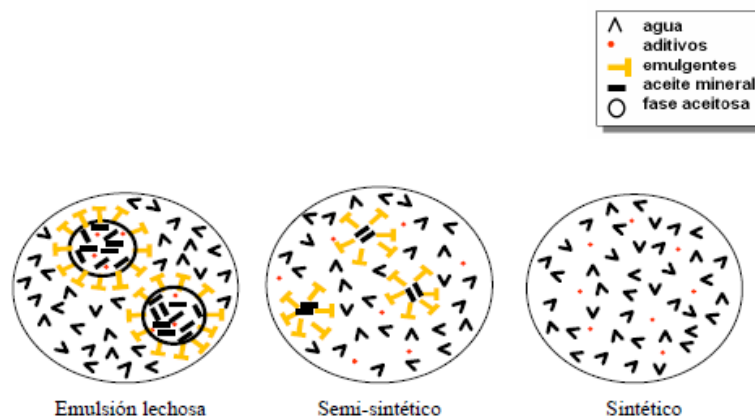


Figura 7. Comparativa del tamaño de las partículas entre fluidos de corte acuosos.

4. Emulsiones “extreme pressure”.

Son fluidos formados por aceites de corte a los que se le han incorporado determinados aditivos. Deben formar con el agua, exenta de dureza, una emulsión estable. Además de poseer una gran capacidad lubricante y un poder antioxidante normal.

Fluidos de corte con base de aceite

Los aceites de corte puros pueden ser productos derivados del petróleo, vegetales o mixtos, con contenido de aditivos y mejoradores, azufre y cloro, entre otros componentes. Debido a que tiene un bajo poder de refrigeración pero alta lubricación, pueden ser usados para repeticiones ligeras de trabajo de un solo husillo, donde no hay que mecanizar materiales difíciles o aleaciones. Básicamente se utilizan en operaciones donde es más importante la lubricación que la refrigeración, a baja velocidad y de corte profundo.

Las principales características de estos aceites son:

- Alta lubricidad
- Excelente control de la viruta
- Larga vida útil

Y las posibles limitaciones que puede presentar son:

- El llenado del tanque es costoso.
- Exceso de generación de calor
- Riesgo de incendio
- Riesgo de superficies resbaladizas o sucias
- Alta neblina de aceite en el aire´

A su vez, podemos encontrar los siguientes tipos:

a) De baja presión

Compuestos de aceite mineral, aditivos antioxidantes y aditivos anti espuma. Deben tener poca viscosidad.

b) De media presión

Constituidos por aceite mineral y aditivos antioxidantes, antiespuma y mild extreme pressure. Las viscosidades de estos aceites deben ser bajas, si bien ligeramente superiores a las de los fluidos de corte del apartado anterior.

c) De extrema presión clorados

Estos deben cubrir una amplia gama de viscosidades y además de los aditivos antioxidantes, antiespuma y mild extreme pressure, debe incorporar aditivos EP.

d) De extrema presión sulfoclorados

Estos aceites contienen lo mismo que los de extrema presión clorados agregando además aditivos sulfurados.

En la siguiente imagen se muestra la proporción del tipo de fluido de corte según el poder refrigerante y lubricante.

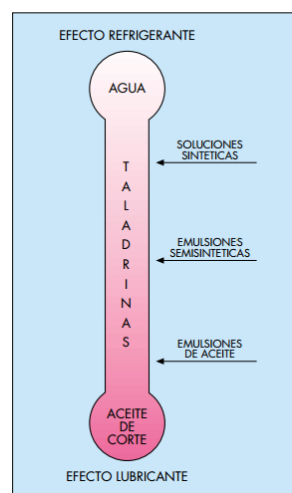


Figura 8. Tipos de fluidos de corte.

En la siguiente tabla se resume la composición aproximada de los diferentes tipos de taladrina y otros fluidos de mecanizado.

Tabla 5. Composición de los distintos fluidos de corte.

Tipo de fluido mecanizado	Composición de concentrados (% v.)				Disolución en agua (% v.)		Comentarios
	Agua	Aceite	Emulg.	Aditiv.	Rango	Usual	
Aceite de corte	0	96	0	4	-	-	Arrastre alto
Taladrina:							
Emulsión aceite	<10	60-80	20	10	3-10	5	Descomposición
Emulsión semisintética	20-50	10-40	10-30	10-30	2-6	2-6	Descomposición
Solución sintética	40-60	<5	>0	40-60	2-5	2,5	Descomposición
Agua	100	-	-	-			Corrosión alta

Factores físico-químicos de los líquidos de corte

Los principales factores físico-químicos que se deben de tener en cuenta en el proceso de corte son los siguientes:

1. pH

Este factor determina el estado de salud del baño.

- Valores:

$\text{pH} \approx \text{pH}_0$: el baño está bien.

$\text{pH} > \text{pH}_0 + 1,5$: el baño es alcalino por lo que disminuye la concentración de bacterias.

$\text{pH} < \text{pH}_0 - 1,5$: el baño es ácido por lo que aumenta la concentración de bacterias.

Siendo pH_0 el pH de referencia.

2. Concentración del producto (%)

Este factor representa la cantidad de producto en el baño. Se determina mediante la medida de la materia que es neutralizable por un ácido (Ej.: HCL) a un pH determinado.

3. Dureza del agua

Determina la estabilidad de la emulsión y la formación de jabones.

- Valores:

No deben de ser ni bajos ($<10^{\circ}F$) ya que aumentaría la formación de espumas, ni altos ($>40^{\circ}F$) porque aumentaría la formación de precipitados, favorecería la corrosión y rompería la emulsión.

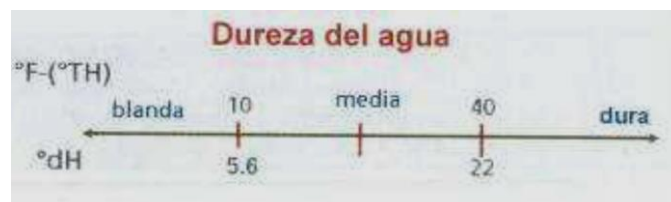


Figura 9. Distintas durezas del agua.

4. Cloruros

Determinan la estabilidad de la emulsión, la corrosión (poder desinfectante como oxidantes) e influyen en la conductividad del baño.

- Valores:

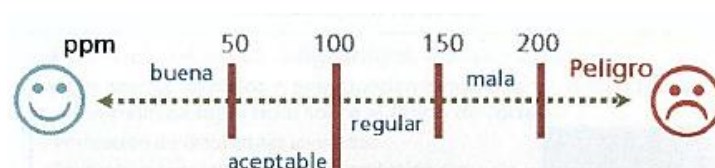


Figura 10. Contenido en cloruros

Si su concentración es mayor a 200 ppm, pueden resultar en corrosiones en los metales férreos y en un incremento de la salinidad del medio acuoso. Puede aumentar la conductividad y producirse una pérdida de la estabilidad de la emulsión.

5. Aceites extraños

Se originan en los sistemas hidráulicos, en los engranajes, guías... Pueden emulsionarse, o formar una película superficial sobre el fluido de corte. Pueden producir:

- La precipitación del aluminio a concentraciones altas.
- Formación de emulsiones invertidas.
- Favorece la contaminación bacteriana.
- Disminuye las propiedades anticorrosivas.
- Aumenta el desgaste de herramientas, disminuyendo la vida útil de las máquinas.
- Aumenta la formación de humos y nieblas de aceite.
- Efectos nocivos sobre la salud.

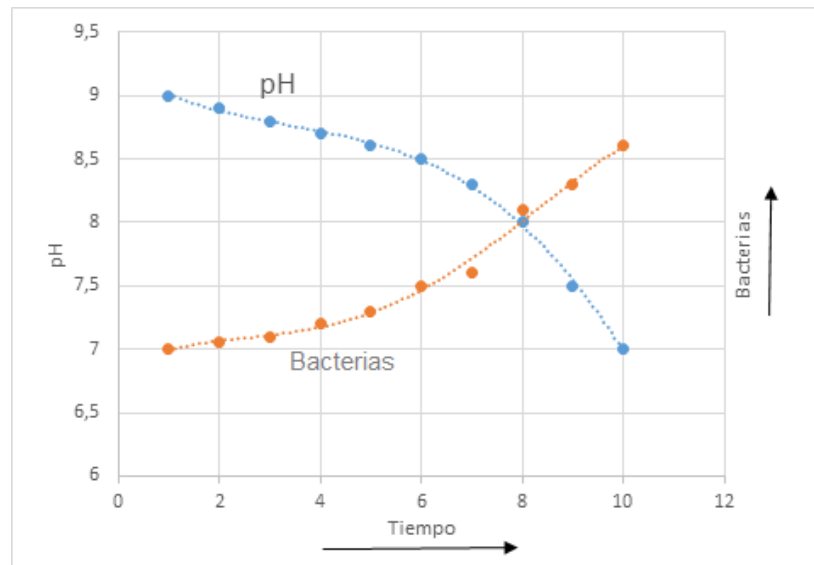
6. Actividad microbiológica

Este parámetro determina la bioestabilidad del producto, es decir: la relación entre bacterias y hongos ya que debe existir un equilibrio entre ambos. Pueden proceder del líquido de corte, de aceites extraños, de trabajadores o piezas tratadas.

- Valores de bacterias y hongos:

Los efectos producidos por concentraciones de bacterias mayores a 10^5 ppm son:

- Disminuye el pH.



Gráfica 1. Variación del pH y del nº de bacterias en función del tiempo.

- Favorece la corrosión de piezas y/o máquina.
- Disminuye la estabilidad y la duración de emulsión.
- Disminuye la lubricación por la destrucción de aditivos.
- Disminuye la vida de las herramientas y por consiguiente, genera acabados deficientes en la pieza mecanizada.
- Genera olores desagradables y problemas dérmicos.

7. Concentración de sólidos en suspensión (ppm).

La concentración de los sólidos en suspensión es uno de los factores más críticos que se deben de controlar. Los sólidos en suspensión pueden ser las virutas de la pieza mecanizada que no han podido ser eliminadas en la central de filtración y que por tanto pueden llegar a la herramienta de corte. La presencia de estas virutas en el fluido de corte recirculado, aparte de que puede obstruir las conducciones de la herramienta, puede actuar como material abrasivo desgastando la herramienta y/o afectar al acabado superficial de la pieza.

A continuación se muestra una tabla que resume el comportamiento de cada uno de los tres tipos de metales (acero, fundición y aluminio) que se utilizan en el proceso de mecanizado en función del medio que los rodea:

Tabla 6. Comportamiento del metal en función del medio que los rodea.

Metal	Componente en medio alcalino	Componente en medio ácido	Observaciones
Acero	No hay problema salvo con cloruros	No hay problema salvo con ácido clorhídrico o derivados clorados	Con ácido nítrico y fosfórico forman una capa de pasivado. Los cloruros forman picaduras sobre la capa de protección.
Fundición	No hay problema	Ataca a metales férreos	Con ácido fosfórico forman una capa de pasivado
Aluminio	Fuerte ataque	No hay problema	Posible formación de un precipitado blanquecino afectando al aspecto de la pieza

Las medidas para mejorar el proceso de mecanizado en función del material a tratar pueden ser:

- Para metales férreos:
 - Emplear agua tratada en ausencia de cloruros y de baja conductividad.
 - Emplear productos de alcalinidad media-alta.
 - Aumentar la concentración del producto.
- Para el aluminio:
 - Emplear productos de alcalinidad baja-moderada.

- No sobrepasar en exceso la concentración recomendada.
- Emplear anticorrosivos específicos: benzotriazol, silicatos.
- Para el cobre y sus aleaciones:
 - Emplear anticorrosivos específicos: benzotriazol, tolitriazol.
 - No usar aditivos de azufre activo.

OBJETIVOS

El proyecto tiene por objeto encontrar una solución a los residuos de fluidos de corte, minimizando el impacto ambiental y el impacto sobre la salud humana.

Se expone cada una de las técnicas actuales para la reutilización de estos fluidos y sus tratamientos, así como alternativas del modo de utilización.

Además, producto de la necesidad de encontrar fluidos de corte que se adapten a las nuevas necesidades de los procesos de fabricación actuales, en este trabajo, se validan nuevos fluidos de corte biodegradables.

Finalmente, se seleccionarán las soluciones más óptimas y respetuosas con el medioambiente.

DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Por todos los impactos generados por los residuos de aceite de corte en el medio ambiente y en la salud humana se explicará a continuación las posibles técnicas de eliminación de este residuo tan perjudicial. Además se plantea su sustitución por fluidos de cortes renovables y biodegradables como otra posible solución ya que la demanda de éstos es bastante creciente. Y también se describirán técnicas que reducen la cantidad de fluidos cortantes proporcionando un resultado similar.

Aunque las plantas de tratamiento de fluidos de corte han existido durante mucho tiempo, muchos de ellos no son adecuados para el tratamiento de los fluidos de corte actuales debido a que la mayoría fueron diseñadas para hacer frente a los fluidos de corte a base de aceite. Estas plantas han tenido que realizar modificaciones para mejorarlas, de modo que puedan usarse para el tratamiento biológico.

Técnicas de reciclaje

Los fluidos de corte en el momento de considerarse agotados, el productor de los mismos debe eliminarlas entregándoselas a gestores de residuos autorizados para proceder a su transporte hasta puntos de descontaminación o eliminación. A pesar de esto, aún es habitual que cierta cantidad de fluidos de corte agotados se eliminen a través de desagües. Esto provoca en las depuradoras de aguas problemas de operación y en caso de llegar a cauces, pueden provocar un desastre en la fauna piscícola debido a su toxicidad.

Con el objetivo de reducir la producción de este residuo, los principales talleres aplican medidas preventivas como reducir derrames, con reposiciones de agua desionizada e implantando procesos de escasa generación de residuos. Pero finalmente siempre existirá una cantidad de fluido agotado que debe ser eliminado. El proceso para tal fin comienza

en los talleres donde se guarda el producto de forma separada del resto de aceites usados en bidones o pequeños depósitos etiquetados hasta el momento de su retirada.

Antes de nada se realiza un pretratamiento para separar posibles aceites parásitos no emulsionados y partículas finas. A continuación se realiza una extracción de partículas finas metálicas que se pueden destinar a valorización. En segundo lugar se aplica el tratamiento destructivo principal basado en alguna o varias tecnologías explicadas en el apartado de técnicas de depuración.

Para comenzar se distinguen dos tipos de reciclaje: Reutilización (interna) y Recuperación (externa).

3 Técnicas de reciclaje externo

Los residuos son retirados por una empresa externa, por ser el residuo útil como materia prima o segunda materia en esa empresa. O se paga a un gestor de residuos para que lo retire y los trate o regenere en sus instalaciones.

3.1 Tratamiento físico-químico

Este tratamiento tiene la finalidad de separar la fase acuosa y la orgánica de los fluidos de corte del tipo acuoso. Así se eliminarían los contaminantes presentes en fase acuosa mediante la adición de reactivos.

Se trata de neutralizar el efecto de los emulsionantes, separando los productos que las forman. En un lado el aceite, los emulsionantes y los aditivos solubles en el aceite, y en otro lado la fase acuosa con el mínimo de carga orgánica.

Para romper este equilibrio entre las fases se utilizan ácidos o sales, o se hace pasar la mezcla por una membrana de

ultrafiltración, quedando las partículas de aceite en emulsión retenidas y concentradas en un depósito.

El fluido necesita una previa filtración para eliminar las partículas de mayor tamaño así como una decantación para favorecer la separación de los aceites por gravedad.

3.2 Evapo-incineración

Esta técnica consiste en segregar la fase orgánica contenida en un fluido de corte acuoso en aquellos casos en los que un tratamiento físico-químico o por ultrafiltración es inadecuado.

Debido a la diferencia de temperatura de ebullición entre el agua y el resto de los compuestos de la mezcla, se puede extraer en forma de vapor el agua, llevando a su punto de ebullición la mezcla. Los aceites y el resto de compuestos orgánicos son concentrados para después ser incinerados en la misma instalación.

3.3 Incineración de residuos halogenados

Esta técnica destruye los compuestos halogenados (principalmente cloro) por combustión, teniendo en cuenta el desprendimiento de cloro y de ácido clorhídrico en los humos.

Mediante la incineración se produce la oxidación de las materias orgánicas contenidas en los efluentes y se transforma en gas carbónico y agua.

Se debe de asegurar el mantenimiento de temperaturas altas (alrededor de 1200 °C) para asegurar la eliminación total de los compuestos que contienen cloro. Los gases y humos son tratados habitualmente por vía húmeda (captación y neutralización) para evitar posible emisiones de ácido clorhídrico.

3.4 Incineración en una cementera

En este tipo de hornos se pueden alcanzar temperaturas mayores a 1400°C durando un tiempo de exposición importante (alrededor de una hora) con la finalidad de destruir los residuos.

Las materias orgánicas contenidas en los residuos de gas carbónico y agua se transforman para recuperar su valor energético y destruir térmicamente las moléculas tóxicas.

Si el residuo es líquido suele ser inyectado sólo o mezclado como carburante. Si es sólido o pastoso, éste es mezclado y triturado con el mineral.

3.5 Valorización de metales

Los metales retenidos en los fluidos de corte al extraerse pueden valorizarse. Los residuos metálicos se clasifican en dos grupos principales para su valorización:

- Restos de metales férreos.

Éstos son reciclados en las fábricas de acero, dentro del proceso productivo. En estos hornos se alcanzan temperaturas de hasta 1600 °C. Según el origen del metal, pueden contener diversas impurezas, que son destruidas por las altas temperaturas, generando llamaradas y humos. Ciertos metales contenidos como el zinc o el plomo son particularmente gasificables y retenidos en los filtros de humos. El cobre, níquel, cromo y molibdeno no se eliminan en la fusión y retornan al acero elaborado. Otros elementos como el aluminio o el silicio son oxidados y aparecen en la escoria.

- Restos de metales no féreos.

Estos metales siguen técnicas específicas de tratamiento. Se selecciona los residuos antes de su trituración, para proceder a su fusión y afinamiento por electrólisis.

4 Técnicas de reciclaje interno

Estas técnicas se basan en el reciclaje del residuo dentro de la propia instalación con la finalidad de reutilizar el residuo en el mismo proceso de fabricación o en otro proceso.

Los fluidos de corte pueden contener una gran variedad de contaminantes líquidos y pastosos. La química, el tamaño de partícula, la geometría y la concentración influirán en el equipamiento y la tecnología a escoger.

Los equipos de limpieza pueden usarse por separado o combinados, y son:

4.1 Tanques de decantación

Se trata de tanques formados por dos secciones diferenciadas y separadas por medio de unas pantallas. En la primera sección los aceites pesados contaminantes se retienen y son recogidos mediante un desengrasante en banda u otro procedimiento. Y una segunda sección en la que se aísla el fluido limpio. Estos pasos se pueden observar en la siguiente imagen.

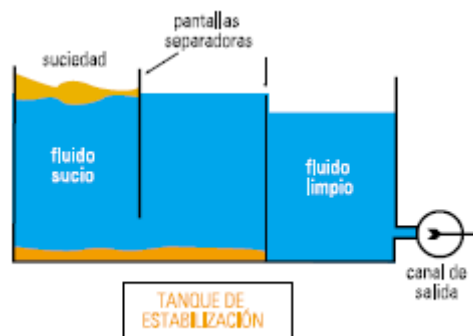


Figura 11. Tanque de decantación.

Las ventajas medioambientales de este sistema son las siguientes:

- Reutilización de los fluidos de corte contaminados de partículas y aceites externos.
- Aumento de la vida útil de los fluidos de corte.
- Reducción del consumo.
- Reducción del volumen de efluentes.
- Disminución del desgaste de herramientas y equipos.

4.2 Tanques de flotación

En este tipo de tanques se producen burbujas debido a la acción de una agitación mecánica o por la introducción de aire comprimido. Las burbujas se pegan a las paredes, mientras ascienden hacia la superficie, arrastrando la contaminación del fluido, formándose una espuma que ha de ser eliminada.

En los fluidos de corte se separa el aceite contaminante externo, ya que éste flota en la superficie promovido por una técnica de aireación. Para su extracción, se puede emplear discos rotativos u otros sistemas destinados para tal fin.

Las ventajas medioambientales de utilizar este sistema son:

- Reutilización de los fluidos de corte contaminados de partículas y aceites externos.
- Aumento de la vida útil de los fluidos.
- Reducción del riesgo de crecimiento de bacterias y desestabilizado de las emulsiones.
- Reducción del consumo.
- Reducción del volumen de efluentes.
- Disminución del desgaste de herramientas y equipos.

4.3 Hidro-ciclones

Los hidro-ciclones actúan imprimiendo una aceleración a los fluidos de corte. El fluido bombeado a gran velocidad se alimenta a un depósito cónico, donde las partículas más pesadas son forzadas contra la pared. Los contaminantes salen por el fondo, mientras que por la presión y por la configuración cónica del recipiente, el fluido limpio sale por la parte superior.

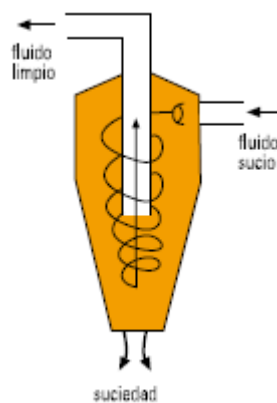


Figura 12. Hidro-ciclón

Los hidro-ciclones pueden utilizarse eficazmente tras los tanques de estabilización para retirar contaminantes residuales. Y suele ser efectivo para fluidos de baja viscosidad.

Sus ventajas son las siguientes:

- Reutilización de los fluidos de corte contaminados de partículas.
- Aumento de la vida útil de los fluidos.
- Reducción del consumo.
- Reducción del volumen de efluentes.
- Disminución del desgaste de herramientas y equipos.

4.4 Separadores magnéticos

Los separadores magnéticos consisten en un tambor magnético que atrae las partículas metálicas inmersas en el fluido de corte facilitando su extracción. En general, este mecanismo es más efectivo en fluidos de base acuosa por tener menor viscosidad. Se pueden emplear cintas transportadoras magnéticas para la eliminación de virutas en los fluidos de corte. Los tanques de estabilización, los separadores magnéticos y las centrifugadoras pueden usarse en combinación para favorecer la limpieza del fluido.



Figura 13. Separador magnético.

Sus ventajas son las siguientes:

- Reutilización de los fluidos de corte contaminados de partículas metálicas.
- Aumento de la vida útil de los fluidos.
- Reducción del consumo.
- Reducción del volumen de efluentes.
- Disminución del desgaste de herramientas y equipos.

4.5 Centrifugadoras

El principio de eliminación es similar al de los hidro-ciclones pero en este caso se realizan aceleraciones más elevadas. Las centrifugadoras son efectivas en un rango variado de viscosidades y se puede diseñar para aplicaciones específicas.

Las centrifugadoras de baja velocidad son efectivas para eliminar partículas, mientras que los de alta velocidad son efectivos para eliminar partículas y manchas de aceite.

Los equipos de centrifugación pueden utilizarse para el escurrido de piezas y virutas metálicas impregnadas de fluidos de corte. Se trata de una operación de separación líquido-sólido. El escurrido de las virutas y de las piezas se produce por la fuerza centrífuga generada a través de un dispositivo al cual se le aplica una velocidad de rotación alta (600 - 2000 rpm). El líquido se deja pasar por un filtro perforado hacia el exterior mientras que los sólidos quedan retenidos. La fuerza centrífuga ejercida depende de la velocidad de rotación aplicada y del diámetro del recipiente. En general la humedad residual de los metales después del proceso de centrifugación se encuentra por debajo del 3%.

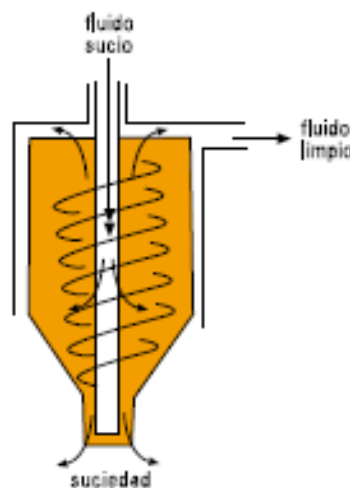


Figura 14. Centrifugadora.

Las ventajas se muestran a continuación:

- Reutilización de los fluidos de corte contaminados de partículas y aceites externos.
- Aumento de la viscosidad de los fluidos.

- Reducción del consumo.
- Reducción del volumen de efluentes.
- Disminución del desgaste de herramientas y equipos.
- Mejora en la valorización de las virutas metálicas.
- Reducción de la contaminación en las zonas de almacén.

4.6 Equipos de filtración

Este procedimiento consiste en hacer pasar el fluido de corte usado y contaminado de partículas a través de diversos materiales filtrantes. La fuerza provocada para la filtración puede ser la gravedad o la aplicación de una presión o vacío. Existe una gran variedad de filtros, de diversos materiales, formas y conformaciones diferentes. La selección de uno u otro depende del tamaño de partícula que se quiere eliminar. Los tubos y hojas de filtro, de materiales como nylon o tejidos de alambres, se usan para extraer pequeñas partículas y favorecer los finos acabados en las operaciones de mecanizado. Las tierras de diatomeas mejoran la filtración y pueden eliminar ciertos aditivos de los aceites.

Sus ventajas son:

- Reutilización de los fluidos de corte contaminados de partículas.
- Aumento de la vida útil de los fluidos.
- Reducción del consumo.
- Reducción del volumen de efluentes.
- Disminución del desgaste de herramientas y equipos.
- Disminución de los riesgos de agresión cutánea.

4.7 Equipos de ultrafiltración

Es una técnica de filtración en la cual el diámetro de los poros de la membrana-filtro es muy pequeño, del orden de 25 Å. De esta forma permite separar las macromoléculas (aceites externos contaminantes, bacterias y diversos contaminantes).

La transferencia de la masa se produce a través de membranas llamadas semipermeables. El fluido se concentra debido a un paso selectivo del agua, mientras que el resto de constituyentes quedan retenidos en función de su tamaño. La transferencia de agua a través de las membranas se debe a un gradiente de presión (150 - 200 kPa). Para evitar el colmatado de las membranas se usa el flujo tangencial, así se efectúa un barrido de la superficie de la membrana evitando la deposición de materia sobre la misma.

Esta técnica se utiliza cuando se requiere una gran calidad del fluido, aunque necesita una filtración previa y técnicas de estabilización para conseguir un procedimiento efectivo.

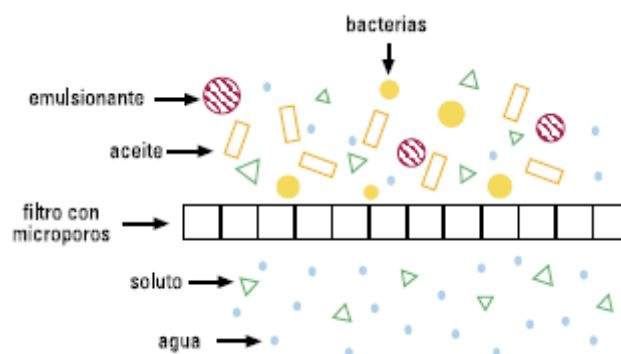


Figura 15. Esquema de ultrafiltración.

Sus ventajas son:

- Obtención de un fluido de alta calidad.
- Reutilización de los fluidos de corte acuosos.
- Control de las proliferaciones bacterianas.
- Incremento de la vida útil del fluido.
- Reducción del consumo.

- Reducción del volumen de efluentes.

4.8 Técnica de micro filtración

Se basa en el mismo principio que la ultrafiltración con la diferencia de que la porosidad nominal de las membranas es superior (del orden de 0,1 a 10 μm), realizando así una filtración más grosera. En este tipo de filtración se emplean membranas cerámicas, las cuales confieren una excelente resistencia mecánica y química al sistema.

Para utilizar la micro filtración, es aconsejable un tratamiento previo de los fluidos de corte usados del tipo filtración, decantación, etc. Esto permite una mayor eficacia del sistema, reduciendo los riesgos de colmatación.

Con la microfiltración tangencial no es posible retener las bacterias. Para ello se recurre a la ultrafiltración.

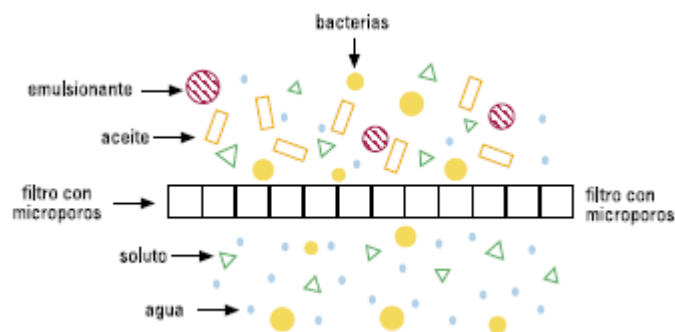


Figura 16. Técnica de microfiltración.

Las ventajas son las siguientes:

- Obtención de un fluido de alta calidad.
- Reutilización de los fluidos de corte acuosos.
- Incremento de la vida útil del fluido.
- Reducción del consumo.
- Reducción del volumen de efluentes.

4.9 Técnica de evaporación al vacío

Se trata de una técnica térmica que permite separar parcialmente el agua contenida en el fluido, mediante calefacción del fluido de corte a una temperatura superior a la de su punto de ebullición. La evaporación a baja presión o vacío permite reducir la temperatura de ebullición y con ello obtener un considerable ahorro en los costes energéticos.

Mediante esta técnica se consiguen dos fases. Una es concentrada, la cual se debe gestionar como residuo tóxico y peligroso, y otra fase de condensado (agua) que podrá ser reutilizada.

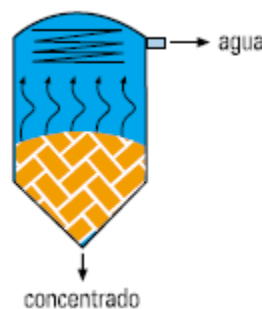


Figura 17. Evaporación al vacío.

Las ventajas medioambientales que presenta este sistema son:

- Reduce el volumen de residuos peligrosos a gestionar.
- Ahorro en los costes de gestión.
- Reutilización del agua de las taladrinas.

4.10 Electrofloclación

La coagulación química ha sido utilizada durante décadas para desestabilizar suspensiones coloidales. Combinada con la floculación química logran la precipitación de especies metálicas, y otras

especies inorgánicas eliminándolas así, mediante sedimentación y/o filtración, de las corrientes líquidas.

Las dispersiones coloidales son partículas que desarrollan cargas, se forma un campo eléctrico muy estable que no permite que las partículas se acerquen y se aglomeren. Para clarificar una dispersión coloidal se debe neutralizar el campo eléctrico para permitir que las partículas se acerquen, se unan o aglomeren, y precipiten.

La Electrofloculación es una técnica que involucra la adición electrolítica de iones metálicos coagulantes directamente del electrodo de sacrificio. Estos iones hacen que los contaminantes se aglomeren como si se adicionara un producto químico como el sulfato de aluminio, cloruro férrico, etc. y permite su remoción.

La adición electrolítica de los iones metálicos tiene una gran ventaja frente a la adición de los químicos. Una de ellas es que no aumenta el número de sales en el agua a tratar y produce la mitad o una tercera parte de lodos.

En la Electrofloculación, se favorece la remoción de los contaminantes debido a que son arrastrados por las burbujas de gas que se generan en el sistema (H_2 y O_2), por lo que tienden a flotar en la superficie. Para tener un mejor rendimiento se debe instalar un sistema que garantice la remoción de la espuma que flota.

Las variables de operación de la floculación son:

- Tipo y dosificación del polieléctrolito ayudante de floculación.
- Velocidad de mezcla lenta para que se unan los coágulos recién formados y formen flóculos de mayor peso y diámetro para que sedimenten fácilmente. Esta aglomeración debe ser suave para evitar que los coágulos puedan romperse y se reviertan a coloidales.
- Tiempo de residencia
- Tasa de disolución de aire en el agua residual
- Velocidad de ascensión de las burbujas
- Densidad (número de burbujas) por área unitaria de flotación

Las ventajas medioambientales que presenta este sistema son las siguientes:

- Reduce el volumen de residuos peligrosos a gestionar.
- Ahorro en los costes de gestión.

4.11 Extracción de los aceites externos presentes en los fluidos de corte acuosos

La capa de aceite debe flotar sobre la superficie del fluido para una separación eficaz, para lo cual el fluido debe permanecer un periodo de tiempo en reposo. Por ello, este procedimiento está limitado en aquellas instalaciones que funcionan a tres turnos, es decir, 24 horas al día.

Cuando los aceites se encuentran en la superficie del fluido, pueden ser recogidos mediante la acción de diversos tipos de desaceitadores.

Los aceites son dirigidos hacia un depósito a través de un tubo colector.

Sus ventajas son las siguientes:

- Aumento de la vida útil de los fluidos.
- Disminución de la proliferación bacteriana.
- Reducción del volumen de efluentes.
- Aumento del tiempo de vida de las máquinas.

4.12 Empleo de briqueteadoras para recuperar los fluidos de corte retenidos en las virutas metálicas

Las briqueteadoras tienen la función de compactar las virutas metálicas procedentes de las diferentes operaciones de corte de metales. Se alimentan de viruta metálica, normalmente

impregnadas de fluidos de corte, y obtienen en su salida el material compactado (briquetas) por un lado y los fluidos de corte filtrados por otro lado. Estos fluidos son reutilizados.

Los residuos metálicos compactados, que ocupan un espacio mucho más reducido, se convierten en materiales de segunda calidad revalorizables y reutilizables por fusión.

Sus ventajas son:

- Reducción del volumen de residuos y de sus costes de almacenamiento y transporte.
- Recuperación de fluidos de corte retenidos en las virutas metálicas para su reutilización.
- Valorización del material briqueteado.
- Reducción de la contaminación en las zonas de almacén.

4.13 Rotura ácida de emulsiones con floculación posterior de sales de hierro

Se trata de un método tradicional que genera grandes cantidades de fangos oleosos con metales. Consiste en el desemulsionamiento del aceite contenido en el fluido agotado. Se basa en el hecho de que la mayoría de los agentes emulsionantes, como jabones y detergentes, son menos efectivos en la estabilización de emulsiones aceite - agua a pH bajo. Así al romper la emulsión, se logran separar las fases.

4.14 Ósmosis inversa

La ósmosis inversa consiste en una membrana semipermeable con la capacidad de separar el agua de sustancias disueltas en ella. Con la aplicación de presión el agua pasa a través de la membrana, separando el agua del agua contaminada con los

aceites y contaminantes. El tamaño de los contaminantes debe ser mayor que el tamaño de la molécula de agua, para que sólo pase por la membrana agua sin contaminante.

El objetivo de la ósmosis inversa en el tratamiento de fluidos de corte es concentrar la contaminación en un reducido volumen.

4.15 Reactor de lechos fluidizados

Hay estudios sobre utilizar un reactor de lecho fluidizado. Sutton parece ser el primero en utilizarlo y en demostrar sus ventajas. Sutton y Mishra trabajaron juntos estudiando técnicas de tratamiento para los fluidos de corte a base de agua y se centraron en la industria del motor debido a las altas cantidades de residuos generados en la industria automotriz

Los lechos fluidizados son capaces de hacer frente a volúmenes más elevados de alimentación y proporcionar gran área superficial para el crecimiento microbiano.

Un lecho fluidizado es un lecho de partículas sólidas en suspensión por efecto del flujo ascendente de uno o más fluidos. Dependiendo del tipo de fluido se distinguen los siguientes lechos fluidizados:

- Gas - Sólido
- Líquido - Sólido

El movimiento aleatorio de las partículas causado por el flujo de fluido ascendente sólo se puede conseguir si la velocidad del fluido supera un cierto límite. Este límite se llama velocidad mínima de fluidización.

En un estudio realizado durante 3 meses por (M. Perez, 2006) de un reactor de lecho fluidizado concluyó sus resultados confirmando que proporciona una buena reducción de la DQO cuando se opera a bajo tiempo de retención hidráulico (TRH).

Principales ventajas de un reactor de lecho fluidizado:

- Empleo de partículas pequeñas con elevada eficacia
- Es un lecho prácticamente isoterma
- Pérdida de presión muy pequeña

Técnicas de depuración

Dentro de las tecnologías aplicadas al tratamiento de los contaminantes orgánicos presentes en los fluidos de corte agotados de origen industrial, el presente apartado se centra en aquellas que producen una transformación de los contaminantes. En los procesos que se suceden se transforma la estructura química de los contaminantes mediante reacciones biológicas y/o químicas promovidas por diversos medios.

Los tipos de técnicas de depuración son los siguientes:

1. Procesos biológicos (aerobios, anaerobios)

Cuando se trata de aguas residuales biodegradables, los procesos biológicos son los más económicos. Sin embargo, cuando las aguas residuales no son biodegradables o se encuentren en concentraciones muy elevadas o presenten grandes variaciones en su concentración o composición, hacen inestable el tratamiento biológico y se debe de recurrir a otras alternativas de tratamiento.

2. Procesos de oxidación química

Estos procesos son importantes en el tratamiento de aguas contaminadas con metales y tóxicos inorgánicos. Se utilizan diversos oxidantes como el cloro, el peróxido de hidrógeno, el ozono, etc.

Las oxidaciones en medios acuosos no son habitualmente peligrosas, pero bajo ciertas condiciones pueden ocurrir reacciones violentas e incluso explosivas al usar oxidantes fuertes como el peróxido de hidrógeno. Si se utilizan estos oxidantes hay que tener precauciones especiales en su almacenamiento y manejo debido a su carácter inestable. Además son altamente corrosivos y necesitan aleaciones especiales como materiales de construcción.

3. Incineración

Entre los procesos destructivos, la incineración es el que se encuentra más implantado para el tratamiento de residuos industriales con altas concentraciones de compuestos orgánicos tóxicos.

La finalidad de esta técnica es tratar los residuos por combustión en un horno donde los humos son depurados para evitar la contaminación del aire y donde la energía disipada por el incinerador es recuperada para la producción de vapor. Consiguen la transformación de la materia orgánica inicial a CO₂ y/o a otros compuestos más biodegradables.

Se pueden tratar residuos líquidos, pastosos o sólidos, los cuales son incinerados en los hornos oxidando las materias orgánicas, transformando los metales en óxidos y evaporando el agua contenida.

En ocasiones se realiza una post-combustión de los gases residuales, tratándose los humos por filtros vía seca y/o húmeda.

Sin embargo, presenta importantes inconvenientes técnicos y económicos, que son los siguientes:

- Elevados costes de inversión y operación
- Necesidad de adicionar un combustible auxiliar cuando las aguas residuales son poco concentradas (<30% en compuestos orgánicos)
- Requerimiento de grandes excesos de aire
- Baja eficiencia térmica
- Oxidación incompleta de los residuos, generando monóxido de carbono, óxidos de nitrógeno, dioxinas, etc.

- Fuerte rechazo social

4. Procesos de oxidación avanzada

Son los procesos de oxidación en medio acuoso que implican la generación de oxiradicales muy reactivos, generalmente el hidroxilo (OH^\cdot).

Presentan las siguientes características:

- Pueden oxidar la materia orgánica hasta dióxido de carbono
- Es posible su aplicación a residuos de naturalezas muy diferentes.
- Los reactivos utilizados como oxidantes se descomponen en productos inocuos.

Estos procesos han seguido dos vías de desarrollo:

4.1 Utilización de oxidantes fuertes

Tales como el ozono, peróxido de hidrógeno, fotones, electrones, etc., así como la combinación de ellos.

4.2 La oxidación hidrotérmica

Consiste en una oxidación acuosa a presiones elevadas y altas temperaturas. Se presenta como una innovadora tecnología depurativa de gran interés debido a sus grandes ventajas frente a los procesos de tratamiento convencionales y amplias posibilidades de aplicación.

En función de las condiciones de operación, existen dos tipos de oxidación hidrotérmica:

4.2.1 La oxidación húmeda

Es un proceso de oxidación de sustancias orgánicas e inorgánicas, formando una emulsión o en suspensión, en fase acuosa a temperaturas y presiones elevadas (100-300°C y 50-200 bar, respectivamente) sin llegar a las condiciones en las que el agua se encuentra en estado supercrítico. Se presenta como una tecnología muy eficaz para el tratamiento de fluidos de corte muy concentrados o con contaminantes tóxicos que impidan un tratamiento biológico y demasiado diluido para ser incinerados.

Las altas presiones permiten la disolución de una mayor concentración de oxígeno en el agua, y las temperaturas altas permiten que la reacción de oxidación tenga lugar a una alta velocidad. De esta manera, se obtienen elevados porcentajes de eliminación en pequeños tiempos de residencia. Además, al ser un circuito cerrado, no existen problemas de emisiones incontroladas de los efluentes líquido y gaseoso.

El agua líquida favorece la oxidación y las reacciones tienen lugar a temperaturas menores al método de incineración. Al mismo tiempo, el agua modera las velocidades de oxidación proporcionando un buen medio para la transferencia de calor, eliminando también el exceso de calor por evaporación.

Se trata de un método simple, adaptable a cambios y variaciones en las características de la alimentación y capaz de tratar una gran variedad de residuos oxidables.

Los principales productos de la oxidación húmeda de compuestos orgánicos son inocuos, generalmente:

- Dióxido de carbono, agua y compuestos orgánicos de bajo peso molecular, principalmente ácido acético.
- En el caso de que contengan heteroátomos, éstos se transforman en productos no peligrosos o fácilmente eliminables.
- El azufre se oxida a sulfato, que permanece en fase acuosa, sin que se produzcan óxidos de azufre.
- El nitrógeno orgánico se convierte en amoníaco, sin que aparezcan óxidos de nitrógeno.
- Los metales pasan a su estado de máxima oxidación y permanecen en la fase líquida disueltos o en suspensión.
- El gas procedente de la oxidación húmeda contiene principalmente el oxígeno en exceso, CO_2 , estando libre de cualquier contaminante atmosférico.

En la figura 19 se representa de forma esquemática un ejemplo de un diagrama general del proceso de oxidación húmeda que se comercializó con el nombre de Zimpro.

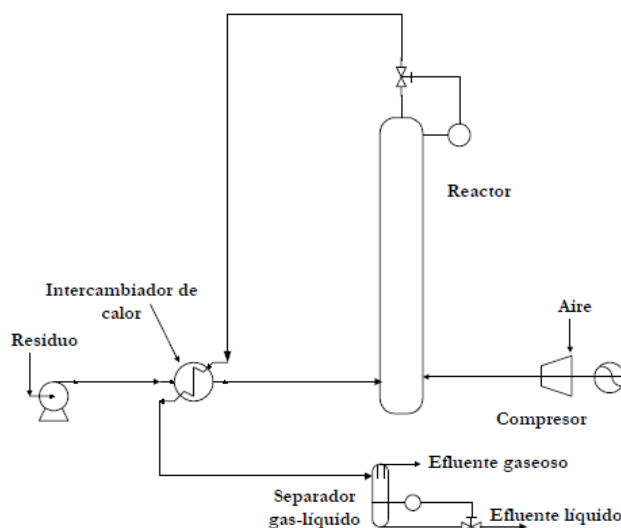


Figura 18. Esquema para la oxidación húmeda mediante el proceso Zimpro.

Como se aprecia en la figura 18 la corriente de entrada contiene la materia oxidable y es bombeada mediante una bomba de alta presión. La corriente de entrada es precalentada mediante un

intercambiador de calor y por el que pasa el efluente de salida a alta temperatura. Como oxidante se puede utilizar aire u oxígeno y se introduce junto a la alimentación o inyectándolo directamente al reactor.

El reactor es una columna vertical de borboteo que proporciona el tiempo de residencia necesario para que suceda toda la oxidación. El calor de oxidación eleva la temperatura del reactor hasta los niveles deseados. En el caso que no lo proporcione, sería necesario inyectar vapor en el reactor.

El efluente a alta temperatura se enfría por intercambio de calor con la alimentación después de regular su presión a través de una válvula de control. Y el líquido y los gases no condensables pasan por un separador y se descargan individualmente.

Desde el punto de vista energético, la oxidación húmeda puede ser un proceso autosuficiente o incluso excedente en energía debido al carácter exotérmico de las reacciones de oxidación. Este calor generado se puede aprovechar para producir vapor o agua caliente. Para que esto suceda y se automantenga sin añadir combustible adicional, es necesario una cantidad mínima de materia orgánica en la alimentación.

Desde el punto de vista económico, este proceso necesita un equipamiento capaz de operar en condiciones de alta presión y temperatura, por lo que la inversión inicial es elevada. Si el fluido de corte no contiene suficiente materia orgánica, esta técnica estaría limitada por los altos costes. Teniendo en cuenta los costes de equipamiento y los costes directos e indirectos de operación, se propone como un método económicamente atractivo para reducir la demanda de oxígeno y mejorar la biodegradabilidad de los residuos más tóxicos.

Algunos inconvenientes del proceso de oxidación húmeda son los siguientes:

- Los largos tiempos de residencia necesarios para completar la eliminación.
- Las limitaciones de transferencia de materia entre fases (gas - líquido).
- La incapacidad para eliminar compuestos refractarios.

Con el fin de aumentar las velocidades de oxidación y favorecer la eliminación de contaminantes se han realizado muchos estudios sobre catálisis en la oxidación húmeda. De este modo, ésta tecnología puede ser competitiva respecto a los tratamientos convencionales. Los catalizadores heterogéneos, que pueden ser fácilmente separados del medio de reacción, son más adecuados que los solubles que han de ser recuperados mediante procesos de separación adicionales.

Por otro lado, se han realizado estudios de reactores que favorecen el contacto entre las fases líquidas y gaseosa, mejorando el contacto interfacial y acelerando la velocidad de reacción, alcanzando un mayor grado de oxidación y necesitando un menor tiempo de residencia.

En la mayoría de los casos de la oxidación húmeda se obtienen como productos finales ácidos orgánicos de bajo peso molecular y otros componentes orgánicos simples. Aunque la eliminación de la carga contaminante es muy alta, puede necesitarse un tratamiento posterior para dichos productos.

Una posibilidad puede ser utilizar la oxidación húmeda como pretratamiento antes de un tratamiento biológico final.

Igualmente, la oxidación húmeda catalítica puede emplearse efectivamente para la destrucción total de los contaminantes

presentes en el agua, sin necesidad de recurrir a una combinación de tratamientos biológicos posteriores.

4.2.2 La oxidación en agua supercrítica

Si las condiciones de presión y temperatura de operación superan el punto crítico del agua (221 bar y 374 °C), la oxidación húmeda deriva en una oxidación en agua supercrítica. De esta forma, se suman las ventajas del proceso de oxidación con las especiales características de los fluidos supercríticos.

Esto aumentaría la eficacia de destrucción de los contaminantes y reduciría el tiempo de reacción necesario, obteniendo como efluente un agua de gran calidad.

En la gráfica 2 se representa el diagrama de fases del agua. A medida que aumenta la presión y la temperatura para las fases líquida y vapor en equilibrio, disminuyen las interacciones intermoleculares debido a la expansión térmica. Por el contrario, para el vapor prevalece el efecto de la compresión frente al de expansión térmica, produciéndose un aumento de las interacciones. De este modo las propiedades del líquido y del vapor se van acercando hasta que, llegados al punto crítico, coinciden. En este punto existe una sola fase (fase supercrítica) con propiedades intermedias entre las de los líquidos y los gases.

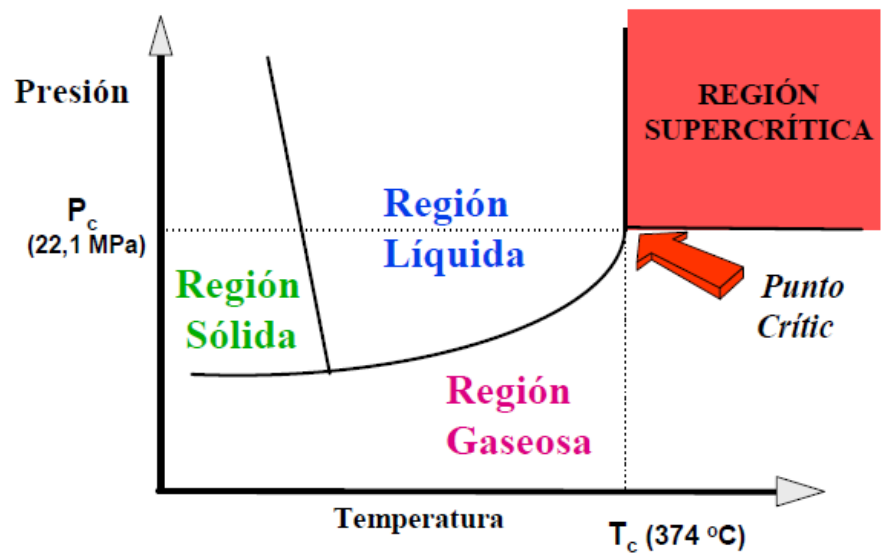


Gráfico 2. Diagrama de fases del agua.

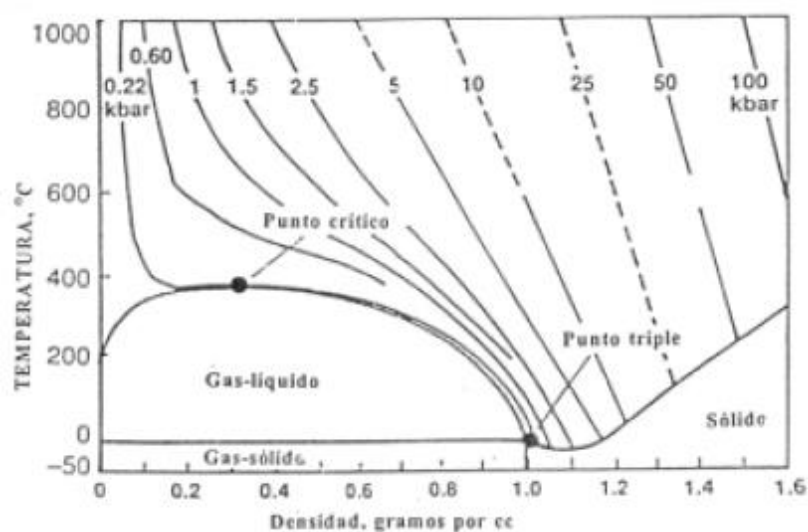
En esta región supercrítica trabaja la oxidación en agua supercrítica.

Las propiedades del agua en condiciones supercríticas son las siguientes:

a) Densidad

En el punto crítico, la densidad es una función muy dependiente de la presión, ya que el fluido es altamente compresible. De este modo, las propiedades dependientes de la densidad, como el parámetro de solubilidad, la constante dieléctrica del disolvente y el volumen molar parcial del soluto sufren grandes cambios al producirse pequeñas variaciones en la presión y la temperatura.

Como puede observarse en la gráfica 3 la densidad del agua supercrítica se puede controlar desde valores cercanos a los del líquido hasta valores próximos a los del estado gaseoso, variando la presión y la temperatura.



Gráfica 3. Diagrama T-P-p para el agua pura.

b) Constante dieléctrica

La constante dieléctrica es consecuencia de las uniones entre distintas moléculas por puentes de hidrógeno. La constante dieléctrica del agua a 25°C y 1 atm es de 80. Sin embargo, disminuye hasta un valor de 5-10 en las proximidades del punto crítico, por lo que tiene un comportamiento más parecido a un disolvente apolar que a uno polar. Así, el agua supercrítica es un disolvente eficaz para los compuestos orgánicos y es completamente miscible con una gran cantidad de gases.

c) Producto iónico

El producto iónico o constante de disociación (K_w) del agua es hasta tres órdenes de magnitud mayores en la región líquida cercana al punto crítico que a temperatura ambiente. En estas condiciones, pueden existir concentraciones mayores de los iones H^+ y OH^- . Por esta razón, puede ser un medio efectivo para reacciones orgánicas catalizadas por ácidos y bases.

Pero si se supera el punto crítico, la constante de disociación disminuye drásticamente por lo que el agua se convierte en un medio pobre para las reacciones iónicas.

d) Viscosidad

El agua supercrítica presenta una viscosidad un orden de magnitud menor que el agua líquida, por tanto los coeficientes de difusión y movilidad iónica son un orden de magnitud mayor.

Cuando la densidad es alta en el agua supercrítica, su viscosidad es baja. De este modo las moléculas de soluto difunden con mayor facilidad a través del agua supercrítica, lo cual lo hace un medio muy favorable para que las reacciones tengan lugar a gran velocidad.

e) Calor específico

El calor específico del agua varía en un rango muy amplio de presión y temperatura, con valores que tienden a infinito en la cercanía del punto crítico. Esto es debido al aporte energético que se necesita para realizar la fuerte expansión térmica que sufre el agua en las cercanías al punto crítico.

f) Conductividad térmica

La conductividad térmica del agua aumenta a presión constante con la temperatura, hasta alcanzar un máximo a los 250°C. A temperaturas supercríticas disminuye levemente como consecuencia de la ruptura de los puentes de hidrógeno.

Gracias a la solubilidad que presentan los compuestos orgánicos y el oxígeno en el agua supercrítica, se puede obtener una única fase homogénea de reacción en la que los contaminantes orgánicos y el agente oxidante están en íntimo contacto. Por tanto, el proceso de oxidación sucede sin limitaciones interfaciales de transferencia de materia, lo que aumenta considerablemente la velocidad efectiva de reacción y permite simplificar mucho el diseño del reactor al poder prescindir de medios de agitación. Por otro lado, debido a la temperatura y densidad molecular del medio, las reacciones de oxidación convencionales tienen lugar de manera rápida y completa.

El proceso se ha aplicado con éxito a gran cantidad de residuos acuosos orgánicos, en escala piloto y experimental, alcanzando eficacias de destrucción de hasta 99,999%.

A continuación se representa un esquema básico de lo que serían las etapas del proceso y los componentes fundamentales.

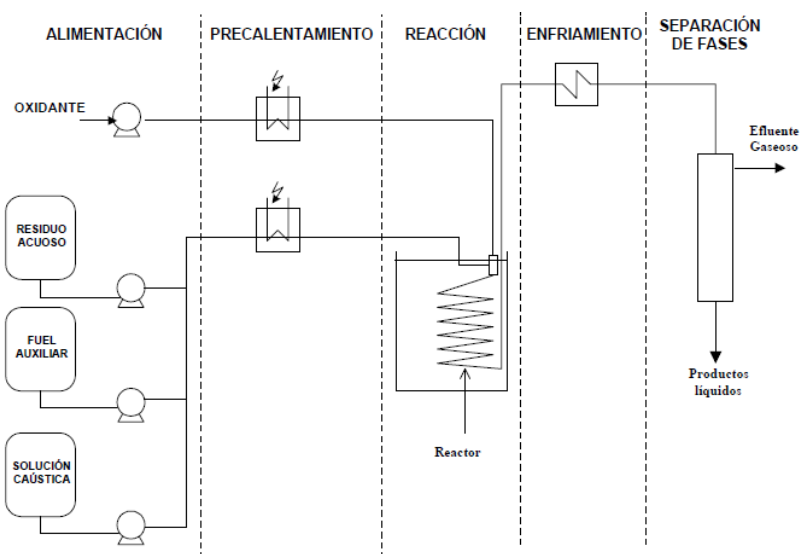


Figura 19. Esquema general proceso de oxidación en agua supercrítica.

En la figura 19 se pueden observar las siguientes etapas:

a) Acondicionamiento de la alimentación y presurización.

La corriente acuosa de alimentación (con compuestos orgánicos y/o inorgánicos) se bombea hasta la presión de operación antes de entrar en el reactor. Por otro lado, se bombea el oxidante elegido hasta dicha presión y se introduce en el reactor.

Si la alimentación no alcanza el contenido entálpico necesario para que la reacción se automantenga sin aporte de calor, es posible alcanzarlo mediante una mezcla con otra corriente más concentrada o con la adición de un combustible auxiliar antes de entrar al reactor. En el caso opuesto, se puede diluir con agua o con una corriente de agua residual de baja concentración.

Cuando el residuo orgánico contiene heteroátomos como Cl, F, P o S, en la oxidación se forman ácidos minerales, por lo que es aconsejable introducir una corriente alcalina que neutralice los ácidos que se formen, precipitándolos en forma de sales.

b) Precalentamiento

Las corrientes de alimentación y oxidante se hacen pasar por intercambiadores de calor por donde fluye el efluente de salida a alta temperatura. Esto facilita la iniciación de la reacción de oxidación.

c) Reacción

La mezcla de las corrientes de residuo orgánico y de oxidante a elevada temperatura origina una rápida

reacción exotérmica que aumenta aún más la temperatura de la mezcla. Esto acelera el proceso de oxidación y se completa en tiempos de residencia muy reducidos.

d) Formación de sales y separación

El sistema debe estar diseñado para separar las sales presentes en la alimentación o que se hayan formado durante la reacción. Éstas precipitan debido a su insolubilidad en agua supercrítica y debido a su densidad caerán al fondo del reactor donde pueden ser retiradas.

e) Enfriamiento

El efluente de salida además de precalentar las líneas de alimentación puede ser objeto de un aprovechamiento energético al presentar un exceso de energía térmica.

f) Despresurización

Una vez enfriado, se separa la fase líquida de la gaseosa. Se lleva a cabo mediante varias etapas para minimizar el desgaste de las válvulas y optimizar el proceso de separación.

g) Purificación del agua de salida

Debido a la naturaleza corrosiva del medio de reacción y a la presencia de metales pesados puede ser necesaria una etapa de purificación cuando se utiliza el agua en un proceso de fabricación o se pretende obtener agua potable.

Desde el punto de vista energético, sólo es necesario aportar calor al iniciar el proceso, ya que las reacciones

exotérmicas que tienen lugar generan el calor necesario para hacer el sistema autosuficiente e incluso obtener un exceso de energía, cuyo exceso puede aprovecharse. En sistemas en continuo el efluente puede utilizarse para calentar la corriente de alimentación hasta la temperatura supercrítica. El exceso de calor generado puede ser usado para generar vapor destinado a la producción externa de energía eléctrica o para cubrir necesidades de procesos industriales a alta temperatura.

Desde el punto de vista económico, el proceso de oxidación en agua supercrítica será más económico cuanto mayor sea la eficacia de destrucción alcanzada y cuanto más se reduzca el volumen del reactor u obtener un tiempo de residencia menor, ya que un elevado porcentaje del coste total del equipo se debe al propio reactor. También los costes de inmovilizado (intercambiadores de calor, compresor, bombas de alta presión, reactor y separador gas-líquido) son muy altos. A pesar de todas las ventajas que presenta, actualmente no se ha implantado comercialmente debido a todos los costes mencionados, que son muy superiores a los de otras tecnologías disponibles.

En la siguiente tabla se muestra una comparación de los costes de inmovilizado y de operación (reactivos, consumo de los equipos, etc).

Tabla 7. Comparación costes de distintos tratamientos.

Costes de inmovilizado		Costes de operación	
Método de Tratamiento	Millones de Euros	Método de tratamiento	Euros por m ³
OASC catalítica con aire	1,51	Incineración (líquidos limpios	15-62

		con gran calor de combustión)	
Incineración	1,76	Incineración (líquidos)	62-277
OASC con aire	1,84	Incineración (líquidos muy tóxicos)	459-921
Oxidación húmeda (con O ₂)	2,16	OASC	43-109
Oxidación térmica en lecho fluidizado	5,83	OASC catalítica	21-95

Como se puede observar en la tabla 7, los costes de inmovilizado son mayores en las técnicas de oxidación húmeda y en lecho fluidizado.

Y por último, desde el punto de vista medioambiental, este proceso se considera ideal, pues cumple las exigencias más restrictivas recogidas en la legislación. El proceso es un sistema cerrado, por lo que el escape de contaminante al exterior es sólo una posibilidad accidental. Además, las sales sólidas separadas por precipitación pueden ser recicladas y el agua recuperada puede ser altamente purificada, pudiendo incluso llegar a ser potable.

Sin embargo, este proceso presenta dos problemas fundamentales:

- La naturaleza corrosiva del medio de reacción.
- La precipitación de sólidos en el medio de reacción. Aparece en el tratamiento de residuos inorgánicos. Los óxidos sólidos que se forman no son adherentes y se desplazan junto al fluido, mientras que las

sales se adhieren a las superficies sólidas, llegando a obstruir el reactor en cortos periodos de tiempo.

Mientras no se encuentre una solución a ambos problemas y a los altos costes, la aplicación a escala industrial está muy limitada técnica y económicamente.

Técnicas de aplicación

Generalmente, el calor producido en la zona de corte del material debido a la fricción entre la pieza y la herramienta de trabajo, es el factor decisivo para la calidad superficial de la pieza terminada. Una comprensión buena sobre los métodos de aplicación del fluido de corte puede reducir considerablemente la generación de calor y así mejorar la calidad superficial. Además, se plantea la sustitución de los aceites de corte convencionales por aceites vegetales siendo éstos mucho más respetuoso con el medio ambiente.

Existen varias técnicas de aplicación explicadas a continuación.

1. Mecanizado en seco

El mecanizado en seco es aquel que elimina completamente el uso de fluidos de corte. Con la ausencia de aceites de corte se solucionarían todos los problemas ambientales que suponen pero hay una serie de desventajas. Las altas temperaturas que se alcanzan durante el mecanizado en seco no son adecuadas para todo tipo de materiales y pueden disminuir la vida de la herramienta y no alcanzarse una buena calidad superficial de la pieza.

2. Técnica “Lubricación por cantidades mínimas” (MQL)

Para superar las limitaciones del mecanizado en seco se introdujo la técnica de “Minimal Quantity Lubrication” (MQL). Esta técnica ha dado resultados muy significativos hasta ahora siendo reconocida como una operación de corte representativa y amistosa con el medio ambiente.

Los métodos de mecanizado que no son completamente secos, utilizan una cantidad mínima de aceite de corte y se denominan “Near Dry Machining”, de los cuales surge el mecanizado MQL. Esta nueva técnica de lubricación minimiza el uso de refrigerante por pulverización de una mínima cantidad de lubricante en forma de aerosol mezclado con aire comprimido. La mayoría de los estudios experimentales han demostrado que la aplicación de MQL produce una mejor superficie que el mecanizado en seco y es similar a la producida bajo el mecanizado en húmedo. Su aplicación también reduce las fuerzas de corte, corte de temperatura de la zona, desgaste de la herramienta, coeficiente de fricción en comparación al mecanizado en seco y el mecanizado en húmedo. El consumo de lubricante es extremadamente bajo siendo éste de 5-50 ml/h. Este tipo de lubricación mínima es el más utilizado y representa un paso intermedio entre el mecanizado en seco y la lubricación convencional.

Asimismo, Hay dos tipos más diferentes de sistemas MQL:

i. Sistemas de pulverizado a baja presión

Consisten en introducir el fluido de corte en una corriente de aire y se transmite en forma de mezcla. Se distingue del anterior porque los flujos de lubricante son aproximadamente de 0,5-10 l/h.

ii. Sistemas de aire

Este sistema utiliza bombas dosificadoras que alimentan con una cantidad determinada de fluido de corte aplicada sobre la superficie activa sin aire. Se utiliza mayormente en procesos intermitentes.

3. Gases refrigerantes

Apoyando el mecanizado en seco surge otra alternativa: la aplicación adicional de gases. El aire es un lubricante límite efectivo. Mediante el enfriamiento de estos gases se mejora la capacidad refrigerante del aire. Gases como el argón, helio y nitrógeno se utilizan algunas veces para prevenir la oxidación de la pieza y las virutas, pero su alto coste generalmente no los hace rentable.

4. Descarga del refrigerante a alta presión

Para lograr el control del desprendimiento de virutas, lo cual causa daños a la herramienta de corte y a las superficies de piezas mecanizadas, es adecuado la combinación de procesos de corte convencionales con lavados de refrigerante a alta presión. El uso de estos fluidos de corte puede ser de hasta 120 bar. No sólo mejora la rotura de la viruta y su evacuación, sino también consigue enfriar la zona de corte. En las siguientes imágenes se muestra las diversas posibilidades para dirigir el flujo de descarga hacia la zona de corte.

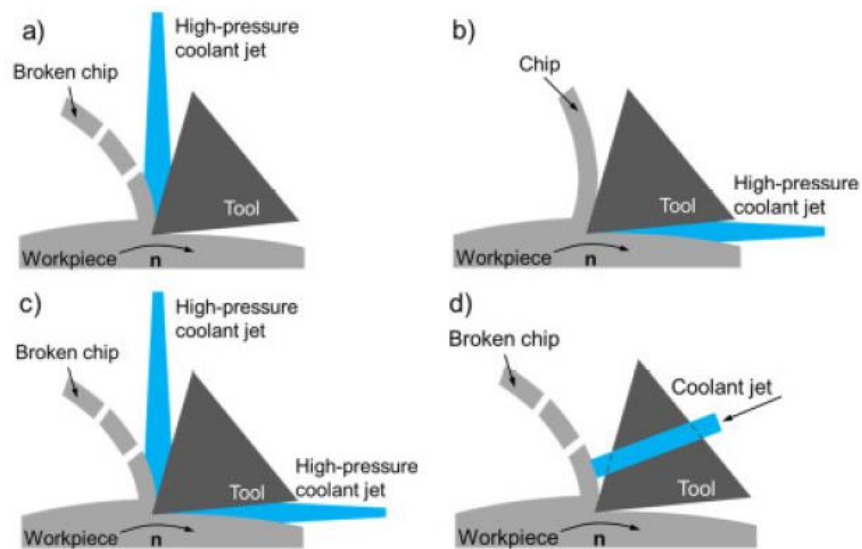


Figura 20. Posibilidades de dirigir el fluido de corte a alta presión.

Para todos los casos si se realizara a baja presión, no llegaría a la proximidad del borde de corte.

El método más común es el de la figura 20a. Debido a la alta presión aplicada, el radio de curvatura de la viruta se reduce y si llega a la rotura, se rompen en trozos pequeños, lo que minimiza el daño y pueden ser retirados fácilmente.

Otra alternativa es la dirección de la figura 20b. donde se enfría la cara de separación con mayor intensidad y llega mucho más cerca del borde de corte. Tiene un alto poder refrigerante pero una pequeña influencia en la rotura de la viruta.

En la figura 20c. combina la cara de desprendimiento y la de separación, refrigerando ambas partes.

Además, el uso de un agujero en la cara de desprendimiento de la herramienta, como se muestra en la figura 20d proporciona una presión muy alta en la proximidad del borde de corte que permite levantar y romper la viruta y reducir significativamente el contacto de ésta con la superficie mecanizada y la herramienta de corte.

5. Enfriamiento criogénico

La aplicación de la estrategia de medios criogénicos ofrece las ventajas del mecanizado en seco en combinación con un suficiente efecto refrigerante. Consiste en la aplicación de nitrógeno líquido o dióxido de carbono en la zona de corte.

La refrigeración con dióxido de carbono se efectúa desde tanques de media presión como un líquido con presión de aproximadamente 57 bar a una temperatura aproximadamente de 20°C a través del husillo de la máquina herramienta a través de tuberías resistentes a la presión. Al salir de los canales de refrigeración, el CO₂ líquido se expande y la presión cae a la presión ambiente ($p = 1,013$ bar). El medio se enfría debido al efecto Joule - Thomson y se transforma en nieve de dióxido de carbono sólido y CO₂ gaseoso. Cuando se utiliza CO₂ como refrigerante, el factor ambiental más importante es el del efecto invernadero que produce el CO₂ en fase gaseosa desprendido, que en comparación con el desprendido de los fluidos de corte convencionales es neutral.

Las propiedades relevantes de nitrógeno criogénico de refrigeración y de lavado son completamente diferentes a las de CO₂, como se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 8. Propiedades relevantes al mecanizado del CO₂ y nitrógeno líquido.

	Dióxido de Carbono (CO₂)	Nitrógeno (N₂)
Temperaturas factibles	-78,5 °C	-196°C
Rango del efecto de enfriamiento	La formación de las bajas temperaturas durante la expansión en la salida.	Efecto de refrigeración que incluye el tanque de almacenamiento, los

		tubos de alimentación y la herramienta de corte
Manipulación / integración en la máquina - herramienta	Sin ningún problema	Aislamiento al vacío del sistema de alimentación total necesaria
Herramientas	Herramienta estándar con sólo algunas modificaciones	Diseño especial de herramientas con aislamiento de suministro

El nitrógeno líquido se almacena en tanques aislados, se transforma bajo la presión ambiente a fase líquida a -210°C . Debido a unas temperaturas más bajas el nitrógeno líquido es un medio de refrigeración más eficiente que el CO_2 . Sin embargo, las bajas temperaturas a presión atmosférica son problemáticos a la hora de su aplicación como refrigerante. Para evitar peligros y una disminución en la eficiencia de enfriamiento, el sistema de suministro (tubos de alimentación, válvulas, componentes de la máquina, la herramienta de corte) tiene que ser protegida de la influencia de las bajas temperaturas. Además, hay que tener en cuenta que el nitrógeno líquido empieza a hervir al entrar en contacto con superficies calientes y forma una película aislante que reduce el efecto de enfriamiento.

Aceites renovables y biodegradables

“En 2005, la cantidad de lubricantes usados en operaciones mecanizadas fue de 38 Mt con un aumento estimado del 1,2% durante la próxima década. Aproximadamente el 85% de los fluidos cortantes usados en el mundo entero son fluidos de corte de base mineral, la demanda más alta entre los demás” (Debnath et al., 2014). Además, “alrededor del 80% de todas las infecciones de los

operadores son debidas al contacto con la piel con fluidos de corte” (Shashidhara y Jayaram, 2010).

Por este motivo y por los impactos mencionados de los fluidos de corte sobre la salud y el entorno han surgido los aceites biodegradables. Estos tipos de aceites han reducido considerablemente problemas ecológicos causados por los fluidos de corte a base de mineral. La demanda creciente de estos fluidos ha dado la oportunidad para desarrollar fluidos de corte a base de verdura, un nuevo fluido de corte bio, que es ecológico, renovable, menos tóxico y biodegradable. Recientemente en Nueva York “Transparency Market Research” ha publicado un nuevo informe del mercado titulado “Synthetic and Bio-Based lubricants- Global Industry Size, Market Share, Trends, Analysis and Forecast, 2012-2018” donde declara que el índice de crecimiento anual de la demanda de lubricantes bio es del 6,6% mientras que esperan que los lubricantes sintéticos aumenten un 2,48%. Esto demuestra que los lubricantes biodegradables van a ir sustituyendo los lubricantes sintéticos.

Los fluidos de corte biodegradables logran la cantidad más baja de contaminación ambiental además de proporcionar la alta fiabilidad y una buena rentabilidad. El ciclo del carbón de un producto renovable está cerrado ya que la cantidad de dióxido de carbono que libera a la atmósfera durante la desintegración de productos químicos orgánicos es equivalente al dióxido de carbono absorbido por las plantas. Al contrario con el ciclo de carbón de un producto mineral ya que aquí el ciclo se encuentra abierto por ser mayor las emisiones de dióxido de carbono y causando el calentamiento global. En la siguiente gráfica se muestra el índice de GWP de CO₂ liberado por el aceite mineral, el aceite de colza, el aceite de palma, grasa animal y aceite de cocina usado:

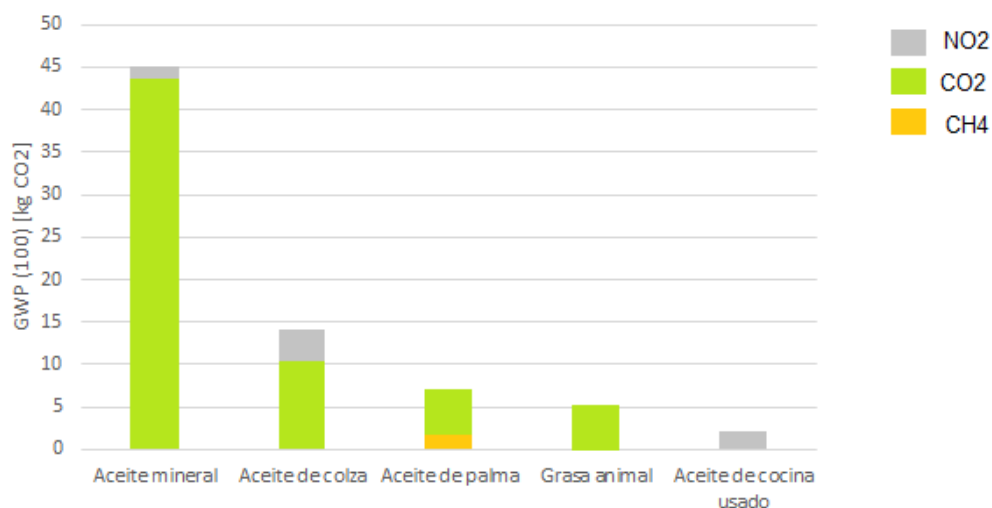


Gráfico 4. Índice de GWP de CO₂ para distintos aceites.

Como se puede observar los aceites vegetales, en particular la de semilla de colza, son algunos de los candidatos más prometedores como bases lubricantes biodegradables. Son además menos costosos que las bases sintéticas y muestran un rendimiento bastante aceptable.

Los aceites vegetales están formados por ácidos grasos, que se diferencian en la longitud de la cadena y el número de dobles enlaces. Las cadenas largas que se forman con un, dos o tres enlaces forman ácido oleico, linoleico o linolenico como se muestra en la figura:

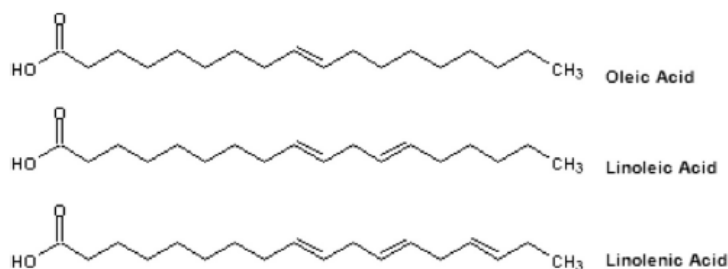


Figura 21. Distintas cadenas de aceites vegetales.

La mayor parte del aceite de verduras consiste en cuatro o hasta doce ácidos grasos diferentes.

Sharma y Singh en 2014 investigaron los efectos en procesos de mecanizado sobre el acero AISI D2 usando un aceite de verduras como lubricante. Los resultados experimentales mostraron que la temperatura cortante disminuía en casi un 50% respecto al mecanizado en seco. El aceite usado es Accu Lube LB-6000 el cual es fabricado con materias primas renovables, no tóxicas y biodegradables, siendo así favorable para el medio ambiente.

Belluco y De Chiffre evaluaron el rendimiento de una gama de aceites minerales y vegetales como fluidos de corte en una amplia gama de operaciones de mecanizado y se encontró que los aceites de base vegetal muestran igual o mejor rendimiento que el aceite de referencia mineral comercial en todas las operaciones.

1. Ventajas y desventajas de los aceites vegetales como lubricantes:

Tabla 9. Ventajas y desventajas de los aceites vegetales como lubricantes.

Ventajas	Desventajas
Alta biodegradabilidad	Estabilidad térmica baja
Baja contaminación del medio	Estabilidad oxidativa
Compatible con aditivos	Altos puntos de congelación
Bajo coste de producción	Baja protección contra la corrosión
Altas posibilidades de producción	
Baja toxicidad	
Altos puntos de inflamación	

Fluido de corte a partir de aceite de microalgas

Aunque hay un gran número de fluidos de corte de aceite vegetal disponibles en el mercado, la sostenibilidad de su producción es cuestionable debido a factores tales como la utilización de tierras agrícolas donde se cultivan alimentos y se agota la fertilidad del suelo. Este problema ha hecho que investigadores desarrollen otra alternativa bio más sostenible.

Las microalgas son seleccionadas debido a su capacidad de fijar una mejor calidad de los lípidos. En un estudio se investigó un tipo de microalga marina, *Nannochloropsis*. La producción a gran escala de estas microalgas para obtener la biomasa se realizó en un estanque abierto usando estanques de canales de conducción a escala piloto en un volumen de 10 000 litros. La investigación confirmó la capacidad de adaptación de un tipo particular de especies de algas. Con disponibilidad a un suministro adecuado de nutrientes y condiciones atmosféricas favorables, este análisis consiguió una concentración de biomasa de 1 g/l en aguas residuales.

Un dato significativo del presente estudio es que se obtuvo 10 g de aceite ceroso de cada 100 g de biomasa, de un total de 5 kg de biomasa húmeda tomada para una extracción. La sustancia cerosa se extrae químicamente es refinada para producir el aceite de algas estable, menos viscoso.

Tabla 10. Comparación de las características físico-químicas entre aceites de algas y aceite vegetal.

Propiedad (unidad)	Método usado	Aceite de alga	Aceite vegetal
Porcentaje de aceite extraído (%)	-	~50	19

pH	pHmetro	7	6,8
Gravedad específica	ASTM D5355	1,305	0,92
Índice de acidez (mg KOH/g)	ASTM D1980-87	2,5339	2,805
Valor de saponificación (mg I₂/100g de aceite)	ASTM D5558	173,56	190
Índice de yodo (mg I₂/100g de aceite)	ASTM D5768-02	52	132
Valor de peróxido (mEq/kg de aceite)	ASTM D3703	5	4,62

El índice de acidez describe el contenido de ácidos grasos libres en el aceite. Sugiere la susceptibilidad del aceite a su deterioro.

El índice de saponificación nos indica la tendencia a la formación de jabón y los índices de yodo indican la susceptibilidad a la oxidación. Es una medida directa de la cantidad de grado medio de insaturación presente en el compuesto.

Por último, el índice de peróxidos describe el comportamiento antioxidante de una sustancia química.

A estos aceites se les puede añadir los aditivos químicos para proporcionar funciones adicionales, como la capacidad de emulsificación, la resistencia a la corrosión al metal, efecto de lubricación para minimizar el desgaste por fricción, el control microbiano durante el almacenamiento, anti-desgaste y condiciones extremas de trabajo.

Las propiedades más importantes de este tipo de aceites es su biodegradabilidad, índice de viscosidad y estabilidad a baja temperatura, que son mejores que los aceites vegetales. Estas propiedades se deben a que el aceite de algas es rico en ácidos grasos poli-insaturados.

Debido al alto índice de viscosidad que presentan los aceites de algas, son muy recomendables para su uso como aceite de corte.

Tabla 11. Comparación de los parámetros de desempeño críticos entre el aceite de algas y aceite vegetal.

Parámetro	Método (ASTM)	Aceite de algas	Aceite vegetal
Índice de viscosidad	D2270	223	192,45
Viscosidad cinemática a 40°C (mm/s²)	D445	6,2	4,5
Viscosidad cinemática a 100°C	D445-95	7,1	9,14
Punto de inflamabilidad	D92	312 °C	320°C
Punto de fluidez	D5949	<-5°C	<-5°C
Índice de refracción	1747-09	1,4	1,3
Marcador ICOT	D7462-11	48 h	50h
Volatilidad NOACK	6375-05	Sin probar	3,6%
Índice de estabilidad oxidativa	D130	96	50 h

CONCLUSIONES

El objetivo de este proyecto es estudiar nuevas técnicas para el tratamiento de los fluidos de corte y distintas alternativas a su uso. Sin duda alguna, la decisión final recae en los costes, pero los motivos económicos salvo que sean desorbitados, no pueden prevalecer cuando existe la gran necesidad de eliminar estos residuos tan problemáticos. En un futuro cercano, la sociedad y la legislación exigirán tratamientos destructivos eficaces y limpios.

Las dos reglas que el usuario debe tener en cuenta en todo momento son:

- a) Cuando en un mecanizado se realizan varias operaciones de corte simultáneas, domina la más difícil y profunda, debiéndose lubricar según corresponda a ella.
- b) A la hora de elegir un fluido de corte, se tendrá en cuenta el precio por kg del mismo, y otros costos como la vida útil de las herramientas, tiempo consumido en el cambio de las mismas si se deterioran con frecuencia, acabado perfecto de las piezas en tiempos mínimos, perturbaciones de las máquinas - herramientas, etc.

1. Elección del fluido de corte.

Cada fluido de corte está determinado para ciertas aplicaciones, que se mencionan a continuación:

- Fluidos acuosos sintéticos: son adecuados para el rectificado de desbaste.
- Fluidos acuosos semisintéticos: Se pueden aplicar a un rectificado de acabado o semiacabado. También en mecanizados de poca exigencia.
- Fluidos acuosos emulsión: Adecuados en operaciones de mecanizado normal.

- Fluidos acuosos emulsión “extreme pressure”: se pueden utilizar sin riesgos en operaciones de mecanizado de gran profundidad.
- Fluidos de media presión: para mecanizados generales de profundidad media y trabajando con metales de buena maquinabilidad.
- Fluidos puros de extrema presión clorados: Para mecanizados de metales de mala maquinabilidad, trabajando en operaciones muy profundas.
- Fluidos puros de extrema presión sulfoclorados: Para trabajos sobre aceros de muy baja maquinabilidad en operaciones de gran exigencia.

Y debido a todos los problemas causados en la eliminación de residuos de aceites de corte agotados, se deben incluir los aceites naturales en las operaciones de corte debido a su gran biodegradabilidad. Se clasifica a continuación para qué aplicaciones son las más adecuadas aplicar aceites naturales.

- El aceite de colza se utiliza para la ejecución de cámaras interiores, desahogos y gargantas, y en trabajos sobre aleaciones de cobre.
- El aceite de palma es adecuado para operaciones realizadas sobre hierro blanco.

Y debido a la poca sostenibilidad de la producción de aceites vegetales, por la utilización de tierras agrícolas y su agotamiento, la opción más ecológica posible sería la elección de los aceites de microalgas.

Debido a los siguientes motivos el aceite de algas puede ser un sustituto eficaz para el vegetal usado actualmente:

- El cultivo de microalgas tiene un enorme potencial para la moderación de la producción de CO₂, además de la gestión de las aguas residuales efluentes, lo que se produce lubricantes industriales altamente sostenibles.
- Los avances tecnológicos tales como los derechos de obtentor, el secado mecánico y el proceso de enriquecimiento nutricional automatizado serían útiles para aumentar aún más la producción de biomasa de algas en estos medios de aguas residuales.
- Nuevas líneas de investigación se han encontrado que buscan la sustitución de los aditivos orgánicos / inorgánicos con materiales bio para mejorar las propiedades de MWF durante las condiciones de trabajo extremas.
- Con aceites de algas modificados químicamente, se consigue un aumento en el rendimiento durante el mecanizado debido a ciertas propiedades, como la estabilidad de alto cizallamiento, propiedades mejoradas de flujo en frío y una mejora de la resistencia a la corrosión.
- Se ha encontrado que existe una fuerte necesidad de promover estudios adicionales sobre las mezclas correctas de fluido de corte de aceite de algas, para utilizarlas para diferentes aplicaciones de mecanizado.
- Aunque las propiedades físico-químicas del aceite de algas son casi equivalentes a las de base vegetal, se necesitan pruebas avanzadas sobre el comportamiento tribológico como hidrófilo lipófilo (HLB), sobre la capacidad de formación de niebla, la medición de la calidad del aire y la DQO de los residuos de algas

cultivadas para calcular el índice general de sostenibilidad de este proceso de fabricación verde.

2. Elección del método de aplicación

La técnica de “Minimal Quantity Lubrication” (MQL) ha dado resultados muy significativos hasta ahora siendo reconocida como una operación de corte representativa y amistosa con el medio ambiente. Esta técnica predomina frente al mecanizado en seco y a los gases refrigerantes, por su alto coste.

En el caso de elegir el enfriamiento criogénico, entre el nitrógeno líquido y el dióxido de carbono, el nitrógeno líquido es el medio de refrigeración más eficiente. Sin embargo, presenta problemas a la hora de la aplicación del refrigerante por las bajas temperaturas a presión atmosférica.

La técnica de “Lubricación por cantidades mínimas” (MQL) consigue minimizar al máximo el consumo de los fluidos de corte y por tanto, los residuos generados, por lo que resulta el método de aplicación más eficaz.

3. Elección del tratamiento

Con el objetivo de reutilizar y reincorporar un fluido de corte agotado al proceso se realizarían los tratamientos mencionados en el apartado Técnicas de reciclaje o una combinación de las distintas técnicas, valorizando después los metales extraídos. Tras estos pre-tratamientos se procedería al tratamiento de los contaminantes orgánicos presentes.

La técnica más viable sería los procesos de oxidación avanzada debido a sus ventajas:

- Pueden oxidar la materia orgánica hasta dióxido de carbono
- Es posible su aplicación a residuos de naturalezas muy diferentes.
- Los reactivos utilizados como oxidantes se descomponen en productos inocuos.

Específicamente la oxidación húmeda, por sus ventajas energéticas, al ser un sistema autosuficiente. Económicamente, necesitaría una inversión inicial elevada, por lo que sería adecuada en los casos en los que el fluido de corte contiene suficiente carga orgánica. En el caso de tener fluidos con poca carga orgánica, se puede utilizar otro tratamiento biológico, ya que son los más económicos.

BIBLIOGRAFÍA

AVEDILLO Enrique, 2015. *Tratamiento y gestión de los residuos del mecanizado*.

Belluco, W., De Chiffre, L. (2001). *Testing of vegetable-based cutting fluids by hole making operations*. Lubrication Engineering 57 (1), pp. 12-16, 26.

Benito V.R. *Aceites de corte y aditivos industriales*. Editorial Gustavo Gili, S. A. Rosellón, 87-89 - Barcelona - 15.

Blau P., Busch K., Dix M., Hochmuth C., Stoll A., Wertheim R. (2015). *Flushing Strategies for High Performance, Efficient and Environmentally Friendly Cutting*. Procedia CIRP, Volume 26, Pages 361-366.

Caro J.L. *Captación de emisiones en la Industria Transformadora del Metal*. Director técnico de Barin, S.A.

Castillo A.H., Rivera G.A. *Congreso bolivariano de ingeniería sanitaria y ambiental “ambiente y desarrollo impulsores del progreso” electrocoagulación, Electroflocculación, electroflotación, y producción, in-situ, de cloro*. PROSELQUIM (Productos y Servicios Electroquímicos).

Chasco A.J.E. (2012). *Empleo de centrales de filtración para reciclar el líquido de corte y revalorizar la viruta*. Trabajo Fin de Máster. Máster en prevención de Riesgos Laborales, Calidad y Medio Ambiente. Universidad de Valladolid.

Cheng C., Phipps D., Alkhaddar R.M. (2005). *Treatment of spent metalworking fluids*. Volume 39, Issue 17, Pages 4051-4063.

Debnath S., Mohan R.M., Sok Y.Q. (2014) *Environmental friendly cutting fluids and cooling techniques in machining: a review*. Journal of Cleaner Production, Volume 83, Pages 33-47.

Decreto 73/2012, de 20 de marzo, por el que se aprueba el *Reglamento de Residuos de Andalucía*. BOJA núm. 81, Jueves 26 de abril de 2012 Consejería de Medio Ambiente.

Femeval. (2013). *Evaluación de riesgo ambiental en el sector metalmecánico*. Guía metodológica. Federación Empresarial Metalúrgica Valenciana.

Iborra M., Tejero J., Cunill F. (2013). *Reactores Multifásicos*. Universitat de Barcelona.

IHOBE. Sociedad Pública Gestión Ambiental. (1999). *Taladrinas agotadas: un residuo a reducir*. 3ª edición, gobierno Vasco, departamento de Ordenación del Territorio, Vivienda y Medio Ambiente.

Kumar S.A., Kumar T.A., Rai D.A. (2016). *Effects of Minimum Quantity Lubrication (MQL) in machining processes using conventional and nanofluid based cutting fluids: A comprehensive review*. Journal of Cleaner Production, Volume 127, Pages 1-18.

Laborda R. *NTP 317: Fluidos de corte: criterios de control de riesgos higiénicos*. Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo.

Lawal S.A., Choudhury I.A., Nukman Y. (2012). *Application of vegetable oil-based metalworking fluids in machining ferrous metals—A review*. International Journal of Machine Tools and Manufacture, Volume 52, Issue 1, Pages 1-12.

Levy N. (2000). *Sludge treatment in the metal-finishing industry*. Metal Finishing, Volume 98, Issue 2, Pages 80-83.

Metal Actual. *Fluidos de corte, más que un simple insumo*. Insumo, pág. 58.
www.metalactual.com

MONTERRUBIO Á.L.A. (2008). *Estudio técnico y económico para la optimización del proceso de taladrado en acero F-1140 mediante el análisis geométrico de la broca y la utilización de técnicas MQL*. Proyecto fin de carrera. Madrid: ICAI.

Pérez A., Alfonso I., Roig M., Oyonarte S. (2006). *Manual de minimización y buenas prácticas en el sector de mecanizado*. Proyecto Ecometal. Herramientas de concienciación y sensibilización para la prevención de la contaminación en el sector metal-mecánico. AIMME.

Pérez A., Roig S.O., Alfonso L. (2006). *Cuaderno de impactos ambientales y buenas prácticas en el puesto de trabajo en el sector de mecanizado*. Proyecto Ecometal. Herramientas de concienciación y sensibilización para la prevención de la contaminación en el sector metal-mecánico. AIMME.

Portela J. R. M. (2000). *Depuración de residuos de taladrinas mediante los procesos de oxidación húmeda y oxidación en agua supercrítica*. Material Mixto. Universidad de Cádiz, Servicio de Publicaciones.

Querétaro, Qro. México. (2004). *Fluidos de corte para la industria metal-mecánica*. Milacron Mexicana sales, S.A. de C.V. División CIMCOOL.

Revista Ambientum. (2004). *Taladrinas agotadas*. Revista on-line de medioambiente.

REAL DECRETO 833/1988, de 20 de julio, por el que se aprueba el Reglamento para la ejecución de la Ley 20/1986, *Básica de Residuos Tóxicos y Peligrosos*.

Sharma J., Singh S.B. (2014). *Investigation of effects of dry and near dry machining on AISI D2 steel using vegetable oil*. Journal of Cleaner Production, Volume 66, Pages 619-623.

Shashidhara Y.M., Jayaram S.R. (2010). *Vegetable oils as a potencial cutting fluid - An evolution*. Tribology International, Volume 43, Issues 5–6, Pages 1073-1081.

Vishnu P., Anbuudayasankar S.P., Ashokkumar A., Sharan A. (2013). *Development of Bio based Semi-Synthetic Metal Working Fluid from Industrial Waste Water*. Procedia Engineering, Volume 64, Pages 1436-1444.

Wakabayashi T. (2010). *The role of tribology in environmentally friendly MQL machining*. Kagawa University, Faculty of Engineering, Department of Advanced Materials Science. JTEKT Engineering Journal English Edition nº 1007E.