

UNIVERSIDAD NACIONAL DE EDUCACIÓN A DISTANCIA

Máster en Ingeniería Avanzada de Fabricación

Trabajo Fin de Máster

TÍTULO: Revisión técnica, económica y medioambiental de los sistemas de lubricación/refrigeración empleados en los procesos de mecanizado

AUTORA: Elisabet Benedicto Bardolet

TUTORA: D.^a Eva M.^a Rubio Alvir

CO-TUTOR: D. Diego Carou Porto

DEPARTAMENTO: Ingeniería de Construcción y Fabricación

UNIVERSIDAD NACIONAL DE EDUCACIÓN A DISTANCIA

Máster en Ingeniería Avanzada de Fabricación

DEPARTAMENTO: Ingeniería de Construcción y Fabricación

TÍTULO: Revisión técnica, económica y medioambiental de los
sistemas de lubricación/refrigeración empleados en los
procesos de mecanizado

AUTORA: Elisabet Benedicto Bardolet

TUTORA: D.^a Eva M.^a Rubio Alvir

CO-TUTOR: D. Diego Carou Porto

DEPARTAMENTO: Ingeniería de Construcción y Fabricación

(A rellenar por la Comisión Evaluadora)

1.1.8.1.1.1 COMISIÓN EVALUADORA

PRESIDENTE: _____

VOCAL _____

SECRETARIO _____

FECHA DEFENSA ____ de _____ de _____

CALIFICACIÓN _____

Vocal

Presidente

Secretario

Fdo.: _____ Fdo.: _____ Fdo.: _____

CÓDIGOS UNESCO

--	--	--	--	--	--	--

--	--	--	--	--	--	--

--	--	--	--	--	--	--

INDICE

Indice	iii
Lista de símbolos	v
Lista de tablas	vi
Lista de figuras.....	vii
Capítulo 1. Introducción.....	1
1.1 Contexto general	1
1.2 Reseña histórica de los lubricantes	3
1.3 Motivación	5
1.4 Objetivos	5
1.5 Metodología	6
1.6 Estructura del trabajo	7
Capítulo 2. Revisión técnica.....	8
2.1 Desgaste y fallo catastrófico de la herramienta de corte.....	8
2.1.1 Mecanismos de desgaste en los procesos de mecanizado.....	8
2.1.2 Tipos de desgaste	12
2.1.3 Fallo catastrófico de las herramientas de corte	14
2.2 Lubricantes y refrigerantes convencionales.....	15
2.2.1 Introducción	15
2.2.2 Propiedades de los fluidos de corte.....	15
2.2.3 Funciones de los fluidos de corte	17
2.2.4 Tipos de fluidos de corte	20
2.2.5 Aditivos de los fluidos de corte.....	23
2.3 Lubricantes y refrigerantes alternativos.....	25
2.3.1 Mecanizado en seco	25
2.3.2 Mecanizado con mínima cantidad de lubricante.....	26
2.3.3 Lubricantes y refrigerantes sólidos	28
2.3.4 Lubricantes y refrigerantes criogénicos	29
2.3.5 Lubricantes y refrigerantes gaseosos	29
2.3.6 Lubricantes y refrigerantes sostenibles	30
2.3.7 Nanofluidos	34
Capítulo 3. Revisión económica.....	35
3.1 Mercado de los lubricantes	35
3.1.1 Mercado de los aditivos	37
3.1.2 Mercado de lubricantes sostenibles.....	38
3.1.3 Mercado español	39

3.2 Evaluación de los costes en los lubricantes y refrigerantes convencionales en el mecanizado	39
3.2.1 Consumo de energía	44
3.2.2 Consumo de agua	45
3.3 Evaluación de los costes de los lubricantes/refrigerantes alternativos en el mecanizado	46
Capítulo 4. Revisión medioambiental	50
4.1 Marco legal	50
4.2 Problemas medioambientales asociados al empleo de lubricantes y refrigerantes convencionales	52
4.2.1 Residuo de fluido de corte agotado	53
4.2.2 Arrastre en piezas y virutas	55
4.2.3 Utilización de sustancias peligrosas	55
4.2.4 Aerosoles y otras emisiones ambientales	59
4.3 Prevención, minimización y valorización	61
4.3.1 Prevención	62
4.3.2 Minimización	64
4.3.3 Valorización	64
4.4 Otras consideraciones	65
Capítulo 5. Conclusiones y desarrollos futuros.....	68
5.1 Conclusiones	68
5.2 Desarrollos futuros	69
Bibliografía	70
Currículum Vitae	80

LISTA DE SÍMBOLOS

ASELUBE	Asociación Española de Lubricantes
BUE	Built-Up-Edge
BUL	Built-Up-Layer
CAGR	Compound Annual Growth Rate
CLP	Classification, Labeling and Packaging
CVD	Chemical Vapor Deposition
EAL	Environmentally Acceptable Lubricants
ECHA	European Chemicals Agency
EHS	Environment, Health and Safety
EMAS	Eco-Management and Audit Scheme
EPA	Environmental Protection Agency
GHS	Globally Harmonized System of Classification and Labeling Chemicals
HSE	Health and Safety Executive
IARC	International Agency for Research on Cancer
MQL	Minimum Quantity Lubrication
MRR	Material Removal Rate
NIOSH	National Institute for Occupational Safety and Health
NNS	Near-Net-Shape
OPRA	Occupational Physicians' Reporting Activity
OSHA	Occupational Safety and Health Administration
PAH	Polycyclic Aromatic Hydrocarbons
PVD	Physical Vapor Deposition
REACH	Registration, Evaluation, Authorization and Restriction of Chemicals
SEM	Scanning Electron Microscope
SST	Seguridad y Salud en el Trabajo
SWORD	Survey of Work-related and Occupational Respiratory Disease
T	Temperatura
VOC	Volatile Organic Compound
δ	Intensidad de desgaste de la herramienta

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 – Etiquetas ecológicas de diferentes continentes y países (EPA, 2011).....	31
Tabla 2 – Ventajas e inconvenientes de los aceites vegetales como lubricantes (Shashidhara y Jayaram, 2010).....	32
Tabla 3 – Ventajas e inconvenientes de los fluidos de corte en el proceso de mecanizado (Hubbard <i>et al.</i> , 2008).....	40
Tabla 4 – Clasificación del grado de necesidad de los requerimientos adicionales de maquinaria y equipos para distintos sistemas de lubricación/refrigeración (Madanchi <i>et al.</i> , 2015).....	46
Tabla 5 – Valoración cualitativa de los costes de los distintos sistemas de lubricación y refrigeración (Boubekri <i>et al.</i> , 2010), (Skerlos <i>et al.</i> , 2008) (Ortuzar y Alberdi, 2012)	49
Tabla 6 – Microorganismos hallados frecuentemente en los fluidos de corte (Schwarz <i>et al.</i> , 2015).....	57
Tabla 7 – Valoración cualitativa del impacto medioambiental de los distintos sistemas de lubricación/refrigeración.....	63
Tabla 8 – Tecnologías aplicadas en la destrucción de fluidos de corte (Ambientum, 2014) (Cheng <i>et al.</i> , 2005)	65

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Objetivos para los sistemas de lubricación/refrigeración (Skerlos <i>et al.</i> , 2008).....	2
Figura 2 – Escenario general del mecanizado. Figura basada en (Fratila, 2010).....	3
Figura 3 – Principales mecanismos de desgaste a) adhesión, b) abrasión, c) fatiga, d) reacción química (Narváez, 2012).....	8
Figura 4 – Intensidad de desgaste de la herramienta en función de la temperatura de corte (Carrilero, 2002).....	8
Figura 5 – SEM de la superficie de un inserto cerámico en el mecanizado en seco. Desgaste adhesivo (Zhuang <i>et al.</i> , 2015).....	9
Figura 6 – Desgaste por adhesión: a) Efecto BUE, b) Efectos BUE y BUL (Carrilero, 2002).....	10
Figura 7 – SEM de la superficie de un inserto cerámico en el mecanizado con refrigeración criogénica. Desgaste abrasivo (Zhuang <i>et al.</i> , 2015).....	11
Figura 8 – Desgaste de la herramienta por fatiga debido a las vibraciones y ciclos térmicos(Byers, 2006).....	12
Figura 9 – Desgaste de a) incidencia en la herramienta de corte y b) desprendimiento en la herramienta de corte (Sandvik, 2007).....	13
Figura 10 – Desgaste por deformación plástica en herramientas de corte: a) por depresión y b) por impresión (Sandvik, 2007).....	13
Figura 11 – Desgaste de la herramienta de corte por astillamiento (Sandvik, 2007).....	14
Figura 12 – Distribución de la energía consumida en los procesos de mecanizado (IHOBE, 1999).....	18
Figura 13 – Espesor de la película lubricante en los distintos regímenes de lubricación: a) lubricación hidrodinámica, b) lubricación mixta, c) lubricación límite (García, 2011).....	19
Figura 14 – Regímenes de lubricación(FIUBA, 2009).....	20
Figura 15 – Taladrinas diluidas entre el 6-10%: a) emulsión soluble y lechosa, b) semisintética, c) sintética.....	22
Figura 16 – Propiedades requeridas del material de las herramientas de corte para el mecanizado en seco (Siniawski y Bowman, 2009).....	25
Figura 17 – Consideraciones para mejorar la sostenibilidad de los sistemas MQL (Skerlos <i>et al.</i> , 2008).....	28
Figura 18 – Desgaste de la herramienta usando distintas condiciones de refrigeración (Sharif <i>et al.</i> , 2009).....	33
Figura 19 – Distribución de la demanda de lubricantes global por región del año 2014(Statista, 2016)(Tocci, 2016).....	35
Figura 20 – Distribución de la demanda global por región y producto del año 2013(Statista, 2016).....	36
Figura 21 – Demanda global de fluidos de corte por regiones en 2014(Grand View Research, 2016).....	36
Figura 22 – Estructura del mercado global de lubricantes en 2014 (Townsend, 2016).....	37

Figura 23 – Predicción del volumen de mercado de aditivos para lubricantes en EEUU en el período, 2014 - 2024, (en miles de toneladas)(Grand View Research, 2016).....	38
Figura 24 – Mercado global de biolubricantes en 2014 en millones de toneladas (Umejei, 2016).....	38
Figura 25 – Estructura de las ventas de lubricantes en España (ASELUBE, 2014).....	39
Figura 26 – Estructura de los costes de fabricación para la producción de los árboles de levas de la industria de automoción alemana (Najihha <i>et al.</i> , 2016)	40
Figura 27 – Relación entre la maquinaria y los equipos, y el flujo de material y energía en la cadena de proceso con uso de fluidos de corte (Madanchi <i>et al.</i> , 2015)	41
Figura 28 – Evolución del precio del crudo del petróleo (EIA, 2016).....	42
Figura 29 – Estructura de los costes de lubricación/refrigeración para la producción de los árboles de levas de la industria de automoción alemana (Najihha <i>et al.</i> , 2016).....	43
Figura 30 – Consumo de energía de distintos sectores en Estados Unidos (2012).....	44
Figura 31 – Demanda de energía en el proceso de mecanizado con fluidos de corte (Madanchi, <i>et al.</i> , 2015).....	45
Figura 32 – Extracción de agua dulce por sectores, en Estados Unidos en 2010 (USGS, 2014).....	45
Figura 33 – Comparación del coste de producción y productividad de los sistemas convencionales de refrigeración frente a la refrigeración criogénica (Hong y Broomer, 2000).....	48
Figura 34 – Balance del proceso de fabricación (Sokovic y Mijanovic, 2001).....	53
Figura 35 – Residuos de los fluidos de corte en la tecnología de mecanizado (Sokovic y Mijanovic, 2001).....	54
Figura 36 – Mecanismos de vaporización y atomización en la formación de aerosoles (Adler <i>et al.</i> , 2006).....	60

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

1.1 Contexto general

Los lubricantes y refrigerantes son productos ampliamente usados en múltiples actividades de la industria. La variedad de productos lubricantes en el mercado es muy diversa, desde lubricantes para el sector del automóvil hasta lubricantes especializados para equipos industriales. En función del tipo y características del proceso de fabricación, el rol del lubricante será uno u otro. En algunos procesos de fabricación por arranque de viruta (mecanizado), como el torneado, es muy importante la disipación del calor y la evacuación de la viruta. Por el contrario, en algunos procesos de conformado sin arranque de viruta, como la laminación donde hay altas fuerzas de compresión, el rol más importante es la protección de las superficies metálicas contra el desgaste mecánico (Tomala *et al.*, 2010).

Los fluidos de corte son lubricantes ampliamente usados en los procesos de mecanizado. Entre las funciones de los fluidos empleados en el mecanizado se destacan disipar el calor, lubricar los elementos, reducir las fuerzas de corte, evacuar la viruta y proteger contra la corrosión, con la finalidad de mejorar el rendimiento del proceso de fabricación. Sin embargo, el uso de los fluidos de corte implica un costo que no puede ser despreciado. Además, hay que tener presente los residuos generados y los efectos que pueden tener sobre la salud y el medio ambiente. Por eso, es necesario saber cómo evitar o reducir su consumo, cómo manipularlos de forma segura y cómo tratarlos (Kamalakar, *et al.*, 2015).

La correcta elección del material y geometría de la herramienta contribuyen primordialmente al éxito del proceso de mecanizado. Sin embargo, los sistemas de lubricación/refrigeración complementan el proceso global (Siniawski y Bowman, 2009).

Mirando hacia el futuro, se deben implementar tecnologías sostenibles capaces de satisfacer las necesidades sin comprometer los recursos y posibilidades de las futuras generaciones. La fabricación sostenible adopta los conceptos de sostenibilidad en los sistemas de fabricación basados en las 6R (reducir, reutilizar, recuperar, rediseñar, revalorizar, reciclar). Por lo tanto, es esencial el surgimiento de avances tecnológicos y desarrollo de procesos para reducir el impacto económico, aumentar el rendimiento del proceso, disminuir el impacto ambiental y disminuir los riesgos sobre la salud y seguridad de los trabajadores (Figura 1). Los factores más importantes para el desarrollo de la sostenibilidad en el mecanizado son los sistemas de lubricación/refrigeración, la vida de la herramienta, la gestión de residuos, junto con el consumo de energía y agua (Najihá *et al.*, 2016).

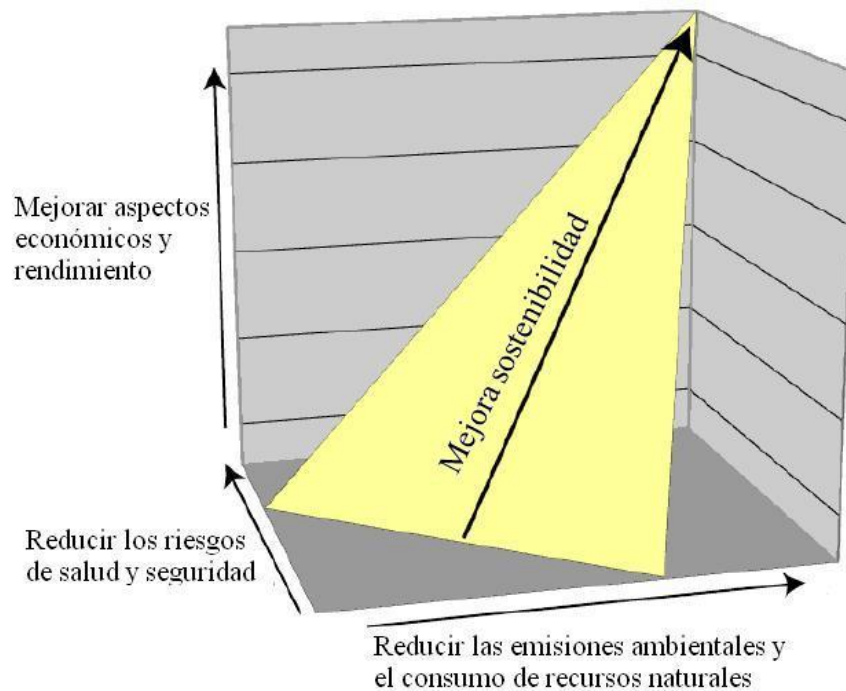


Figura 1 – Objetivos para los sistemas de lubricación/refrigeración (Skerlos *et al.*, 2008)

El proceso global de mecanizado incluye varias actividades que empiezan con la producción del material. Los procesos de fabricación que permiten alcanzar las dimensiones geométricas más próximas a la forma final requerida o NNS (del inglés, *Near-Net-Shape*) reducen la cantidad de material a mecanizar. Para poder realizar el mecanizado es necesario tener la máquina-herramienta en las condiciones adecuadas, la preparación de la herramienta y del fluido de corte. El fluido de corte se prepara a partir de aceites de corte y aditivos y, habitualmente, se diluyen en agua. Durante el proceso de eliminación de material de la pieza, el fluido es recirculado en el sistema hasta que deja de realizar sus funciones (Park *et al.*, 2009).

Al finalizar el proceso se obtiene un fluido de corte contaminado que debe ser tratado y unas virutas y una pieza con restos de fluido de corte. La pieza que arrastra el fluido de corte debe pasar por un proceso de limpieza en el que se consumen, además de detergente, grandes volúmenes de agua y energía. Tras la limpieza se obtiene la pieza limpia y aguas residuales con aceites y detergentes que deberán ser tratados adecuadamente. La Figura 2 muestra el escenario general del mecanizado con los procesos más importantes incluyendo el flujo de agua y energía (Fratila, 2010).

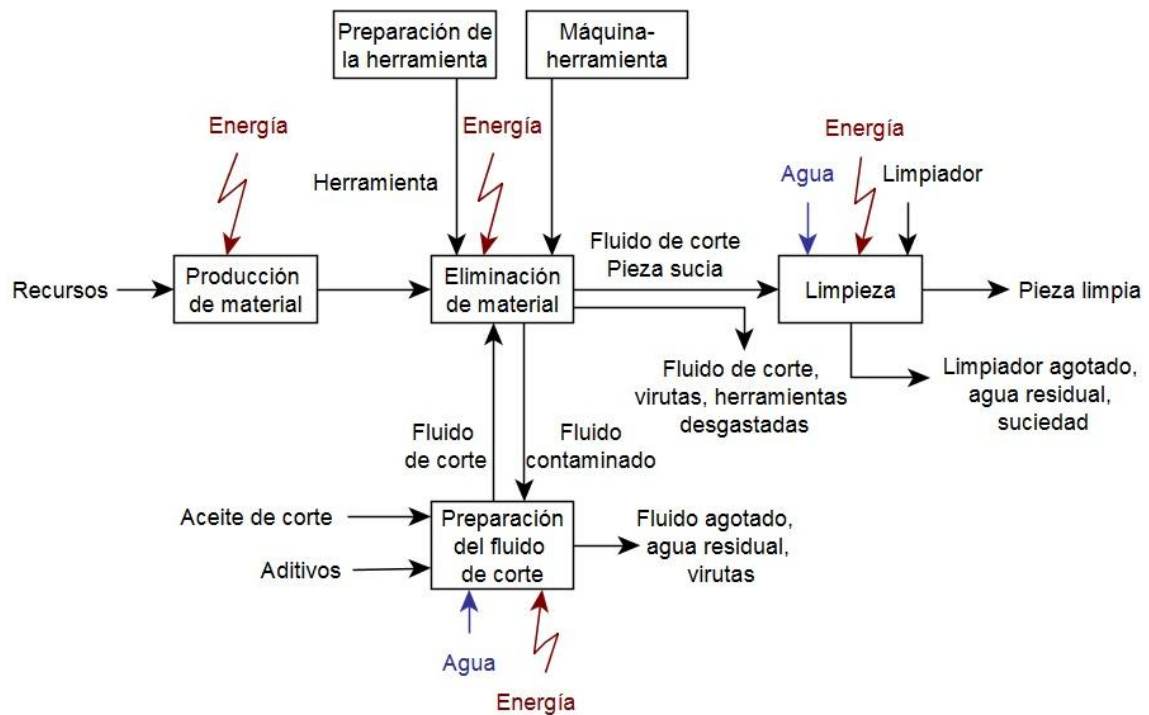


Figura 2 – Escenario general del mecanizado. Figura basada en (Fratila, 2010)

1.2 Reseña histórica de los lubricantes

La humanidad ha usado aceites y grasas desde hace muchos siglos. Las civilizaciones de Mesopotamia y Egipto empleaban los lubricantes para resolver problemas de fricción en los ejes de sus carros. El agua, las grasas animales (de ballena, vacuno y ovino, principalmente) y los aceites vegetales (oliva, palma, colza y ricino, por citar solo los más empleados) fueron los primeros productos utilizados en procesos de corte y moldeo de metales (Byers, 2006). En las civilizaciones griegas y romanas se subestima el conocimiento relacionado con la práctica de la lubricación en trabajos de estratos sociales bajos, por lo que no existe documentación sobre los métodos usados (Rodríguez, 2011). En los años 79 a 23 a.C., Dioscurides y Plinio hicieron una lista de aceites vegetales que consideraban que podían usarse como lubricantes (Martín, 2010).

Leonardo da Vinci (1452-1519) ha sido considerado como el padre de la tribología moderna. El científico estaba familiarizado con los conceptos básicos de fricción, lubricación y desgaste y postuló dos leyes fundamentales de la fricción, aunque no fueron anunciadas hasta unos 200 años más tarde por Guillaume Amontons, con cuyo nombre están generalmente asociadas (Hutchings, 2016):

- La resistencia al deslizamiento tangencial entre dos cuerpos es proporcional a la fuerza normal ejercida entre los mismos.

- La resistencia al deslizamiento tangencial entre dos cuerpos es independiente de las dimensiones de contacto entre ambos.

Leonardo da Vinci descubre el principio del rodamiento y presenta el diseño del primer rodamiento axial de bolas. Sin embargo, no fue hasta el siglo XVII, cuando Newton planteó las leyes fundamentales por las que se rigen los fenómenos de lubricación (Martín, 2010).

Con la Revolución Industrial y los primeros pasos de la explotación petrolera hubo una creciente necesidad de sistemas de lubricación. Surgieron sistemas basados en jabones metálicos de aluminio, bario y sodio, entre otros. Se empiezan a desarrollar y usar las primeras grasas a base de aceite mineral, en las vagonetas de las minas y máquinas de la industria. Alrededor de 1890, se hizo indispensable la utilización de fluidos de corte en los motores eléctricos que permitían trabajar con máquinas a altas velocidades (Rodríguez, 2011).

Durante la Primera Guerra Mundial, Estados Unidos no podía importar aceite desde Rusia. Como alternativa, se usaba la reacción de acidificación de aceites neutros con ácido sulfúrico, resultando una mezcla de aceite con sulfonatos del petróleo. Los ácidos grasos también eran usados como lubricantes, aunque éstos tenían efectos adversos como malos olores, ranciedad y podían provocar problemas dermatológicos (Byers, 2006).

Los primeros estudios sobre las virutas resultantes del corte de metales empezaron con la Segunda Guerra Mundial, cuando hubo una demanda rápida de producción de armamento. Uno de los descubrimientos fue que aproximadamente dos tercios de la potencia total usada en el proceso era consumida en el proceso de deformación del metal, mientras que la restante era perdida por el rozamiento contra la viruta (Rodríguez, 2011). Los estudios posteriores estaban focalizados en la formulación de fluidos de corte que permitieran reducir la fricción a la vez que ayudaran a retirar la viruta producida. Sin embargo, se vio que también existía la necesidad de refrigeración y, debido a que el agua había sido usada como el principal refrigerante de bajo coste, se desarrollaron fluidos de corte con poder lubricante y estables en agua con la ayuda de aditivos. En 1945 se inventaron los primeros fluidos sintéticos, CIMCOOL®. Dos años después surgieron los fluidos semisintéticos, con mayor poder lubricante, con función anticorrosiva y una aceptable refrigeración (Byers, 2006).

Alrededor de 1950 se empezó a usar una grasa multiuso con base de litio y, poco más tarde, se convirtió en la grasa más usada para los vehículos a motor y las máquinas industriales. Actualmente aún sigue siendo la grasa más usada en el mundo industrial. Los aceites animales y vegetales tienen mayor poder lubricante que los de origen mineral, sin embargo, son menos estables, se oxidan y se descomponen con mayor facilidad. Estos son algunos de los motivos por los que actualmente los lubricantes más empleados son de origen mineral (Erhan *et al.*, 2006).

1.3 Motivación

Los sistemas de lubricación/refrigeración son necesarios para casi todos los procesos de fabricación. La industria de lubricantes evoluciona constantemente para ofrecer productos de mayor rendimiento y nuevos productos que cumplan los requerimientos de los nuevos procesos de fabricación. Los lubricantes necesitan cada vez unos requisitos técnicos, medioambientales y económicos superiores.

Alrededor del 70% de los fallos mecánicos tienen origen en problemas de lubricación por varios motivos, entre ellos la mala selección del lubricante; un almacenamiento inadecuado; contaminación con polvo o agua, con otros agentes nocivos u otros lubricantes; falta de procedimientos de lubricación; un material inadecuado de transferencia; o la falta de un mantenimiento predictivo y proactivo (Terradillos, 2013).

El conocimiento básico de la tecnología de lubricación permite una mejor elección de los sistemas de lubricación/refrigeración para cada necesidad. Para avanzar en el camino de la sostenibilidad se deben desarrollar procesos y tecnologías más eficientes en términos de uso de recursos y generación de desperdicios.

Los efectos perjudiciales de los lubricantes en el medio ambiente y en la salud de los trabajadores han sido ampliamente estudiados. Actualmente, gracias tanto a las regulaciones existentes como al crecimiento de la conciencia ambiental, hay una tendencia en la disminución de productos peligrosos. Aun así, hay mucho camino para recorrer y alternativas que deben ser estudiadas.

1.4 Objetivos

Para el desarrollo de este trabajo se definen los siguientes objetivos principales con el fin de tener una visión de conjunto del campo de los fluidos de corte y sus principales alternativas desde un punto de vista técnico y conocer detalladamente la influencia que la lubricación/refrigeración ejerce en los procesos de mecanizado y la influencia que el uso de estas técnicas tienen en el medio ambiente.

El primer objetivo del trabajo es realizar un estudio técnico de los sistemas de lubricación/refrigeración convencionales usados en la industria del mecanizado, y conocer las alternativas de estos sistemas.

El segundo objetivo es evaluar el impacto económico de los sistemas de lubricación/refrigeración tanto a nivel macroeconómico como microeconómico.

El tercer objetivo es compilar información sobre los efectos medioambientales de los sistemas de lubricación/refrigeración convencionales y proponer alternativas para intentar reducir o disminuir los efectos perjudiciales.

1.5 Metodología

Para el desarrollo del trabajo se han usado algunas de las principales bases de datos científicas empleadas ampliamente en el ámbito de la investigación en ingeniería. Entre estas se destacan las bases de datos ScienceDirect y SpringerLink. Como criterios de selección de la información se ha procurado seleccionar referencias actuales publicadas en revistas científicas internacionales revisadas por pares. Entre las principales revistas científicas consultadas se destacan las siguientes:

- CIRP Annals – Manufacturing Technology.
- Industrial Crops & Products.
- Industrial Lubrication & Tribology.
- International Journal of Advanced Manufacturing Technology.
- International Journal of Machine Tools & Manufacture.
- International Journal of Precision Engineering & Manufacturing.
- International Journal of Sustainable Manufacturing.
- Journal of Cleaner Production.
- Journal of Manufacturing Technology Management.
- Journal of Materials & Processing Technology.
- Machining Science & Technology.
- Renewable & Sustainable Energy Reviews.
- Tribology International.
- Tribology Letters.
- Wear.

Durante la realización del trabajo también se han consultado varios libros relacionados con la ingeniería de fabricación y los fluidos de corte:

- Byers, J. P., Metalworking fluids, STLE, 2ª Edición, 2006.
- Groover, M. P., Fundamentos de manufactura moderna, McGraw-Hill, 3ª Edición, 2007.

Además se han consultado dos tesis doctorales que han servido como referencia:

- Carou, D., Estudio experimental para determinar la influencia de la lubricación/refrigeración en la rugosidad superficial en el torneado intermitente a baja velocidad de piezas de magnesio, Departamento de Ingeniería de Construcción y Fabricación, Universidad Nacional de Educación a Distancia (UNED), Madrid, 2013.
- Garcia, A., Diseño, selección y producción de nuevos biolubricantes. Departamento de Bioingeniería, Institut Químic de Sarrià (IQS), Barcelona, 2011.

1.6 Estructura del trabajo

El trabajo se ha dividido en 5 capítulos. Se presenta a continuación un breve resumen del contenido de los mismos:

- Capítulo 1. Introducción: contiene un breve resumen general del tema de estudio en el que se presenta una reseña histórica de los sistemas de lubricación/refrigeración. Se incluye la motivación del trabajo y los principales objetivos a alcanzar, así como la metodología y la estructura del estudio.
- Capítulo 2. Revisión técnica: muestra los diferentes tipos y mecanismos de desgaste de la herramienta en el proceso de mecanizado. Se estudian los distintos sistemas de lubricación/refrigeración usados en la industria, y las ventajas que ofrecen en el proceso de mecanizado.
- Capítulo 3. Revisión económica: estudia el mercado actual de los lubricantes y evalúa los costes de los sistemas de lubricación/refrigeración utilizados en el proceso de mecanizado.
- Capítulo 4. Revisión medioambiental: presenta el marco legal a los que están sometidos los fluidos de corte y los problemas medioambientales relacionados con su uso. Se desarrolla la estrategia de prevención, minimización y valorización de los fluidos de corte.
- Capítulo 5. Conclusiones y desarrollos futuros: recopila los conceptos más importantes de los capítulos anteriores y presenta las principales líneas de trabajo para el desarrollo de futuros trabajos.

Se incluye un apartado de bibliografía que recopila el conjunto de referencias bibliográficas que han permitido el desarrollo del presente trabajo.

CAPÍTULO 2. REVISIÓN TÉCNICA

2.1 Desgaste y fallo catastrófico de la herramienta de corte

2.1.1 Mecanismos de desgaste en los procesos de mecanizado

El desgaste de las herramientas de corte significa que existe una modificación de su geometría, que tiene lugar durante el corte. Existen varios mecanismos de desgaste por: adhesión, abrasión, difusión, reacción química, por deformación plástica y fatiga (Figura 3) (Narváez, 2012).

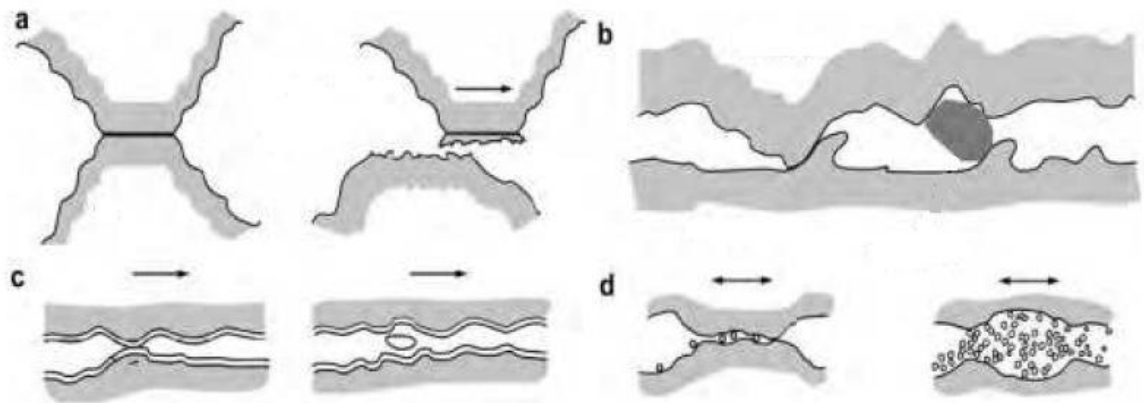


Figura 3 – Principales mecanismos de desgaste a) adhesión, b) abrasión, c) fatiga, d) reacción química (Narváez, 2012)

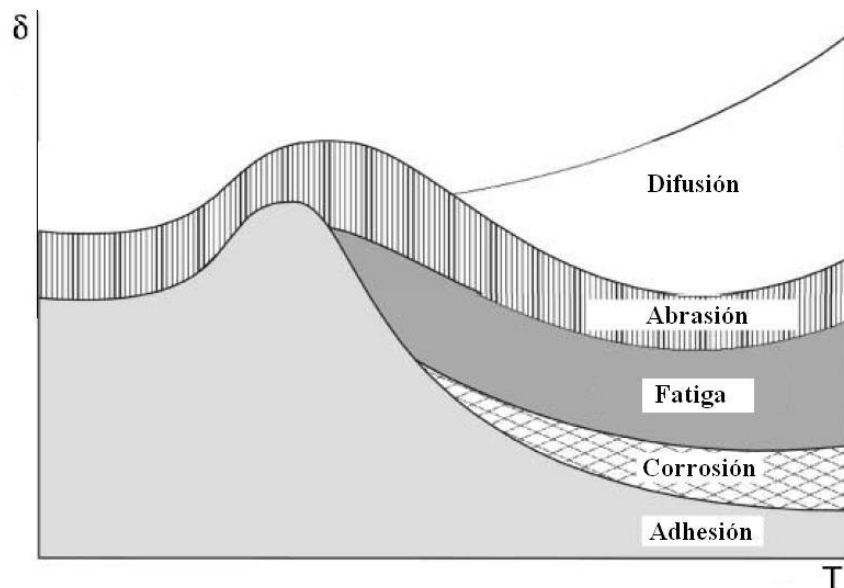


Figura 4 – Intensidad de desgaste de la herramienta en función de la temperatura de corte (Carrilero, 2002)

La Figura 4 muestra la intensidad de desgaste de la herramienta (δ) en función de la temperatura de corte (T) para distintos mecanismos de desgaste. Por un lado, se observa que para temperaturas de corte bajas, la adhesión y la abrasión tienen una mayor influencia en el desgaste de la herramienta. Por otro lado, la difusión, la corrosión y la fatiga se presentan a elevadas temperaturas de corte (Carrilero, 2002).

A continuación se describen en detalle los principales mecanismos de desgaste.

Desgaste por adhesión

Al aplicar una fuerza entre dos superficies (en particular entre la pieza y la herramienta en los procesos de mecanizado), los puntos de contacto se deforman iniciando el crecimiento de uniones entre ellas. La tendencia a formar uniones adhesivas depende, principalmente, de las propiedades fisicoquímicas de los materiales en contacto (como la estructura electrónica y la estructura cristalina), de la carga y de características superficiales, del grado y tipo de contaminación que presenten. Debido al movimiento relativo entre las superficies, originado por una fuerza tangencial, las uniones se fracturan, liberando pequeños fragmentos del material de la herramienta que se transfieren entre las superficies o quedan como partículas libres (Narváez, 2012).

En la Figura 5, se puede ver un ejemplo del mecanismo de desgaste por adhesión mediante una imagen SEM (del inglés, *Scanning Electron Microscope*). El microscopio electrónico de barrido o SEM utiliza un haz de electrones acelerados por un campo eléctrico para producir imágenes de alta resolución de la topografía superficial de la muestra (Shi *et al.*, 2010).

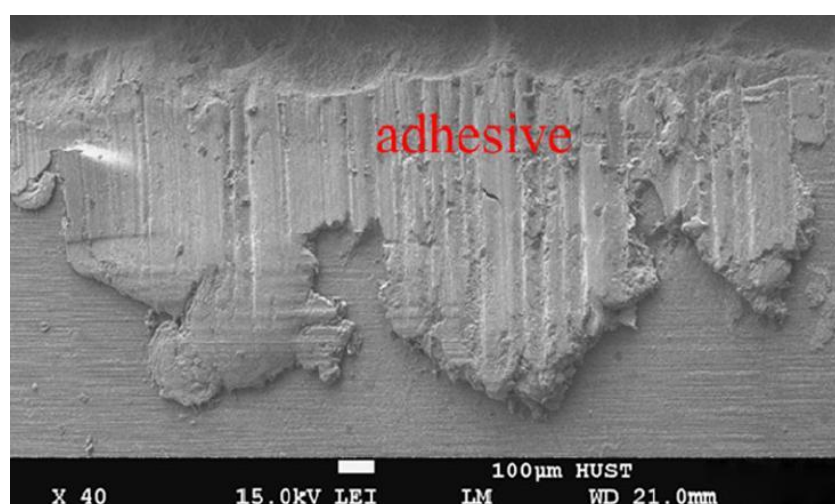


Figura 5 – SEM de la superficie de un inserto cerámico en el mecanizado en seco. Desgaste adhesivo (Zhuang *et al.*, 2015)

El rozamiento existente entre la cara de incidencia y la superficie mecanizada da lugar al desgaste por adhesión. Los pequeños fragmentos de material quedan adheridos a la superficie de la herramienta (Figura 6), originando coeficientes de fricción inestables, pérdida de las tolerancias y líneas de rayado en la superficie del sistema herramienta-pieza (Carrilero, 2002). Los dos principales efectos del desgaste por adhesión de la herramienta de corte son:

- Filo recrecido o BUE (del inglés, *Built-Up-Edge*): el material queda adherido en el filo de la herramienta (Carrilero, 2002).
- Capa adherida o BUL (del inglés, *Built-Up-Layer*): el material queda adherido en la cara de desprendimiento. Puede asociarse a la fusión inicial de la matriz metálica seguida de un proceso de extrusión debido a las fuerzas de compresión entre la viruta y la herramienta (Gangopadhyay *et al.*, 2010).

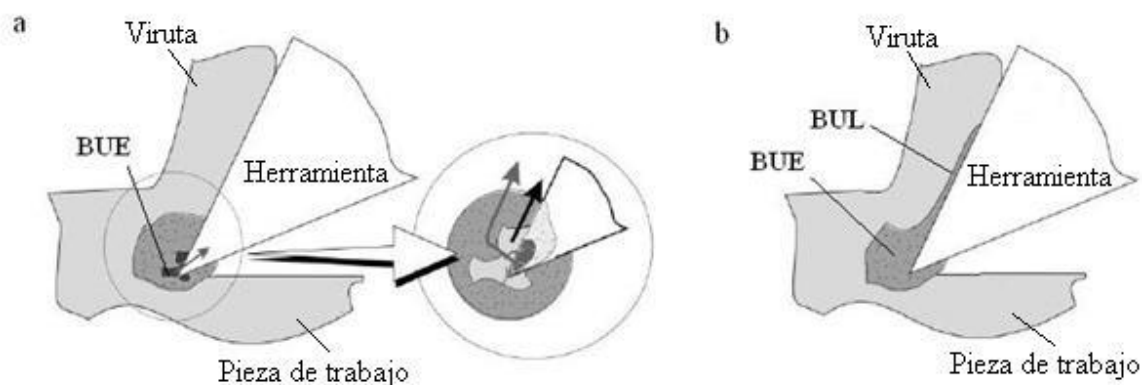


Figura 6 – Desgaste por adhesión: a) Efecto BUE, b) Efectos BUE y BUL (Carrilero, 2002)

Desgaste por abrasión

Este mecanismo de desgaste consiste en el desplazamiento y eliminación de material de una o de las dos superficies en contacto, produciendo daño por deformación plástica y fractura. Ocurre cuando las partículas de la viruta, endurecidas por deformación plástica, deslizan por la cara de desprendimiento de la herramienta. Estas partículas endurecidas pueden ser fragmentos de filo recrecido inestable, fragmentos de material de la herramienta arrastrados por la viruta y debidos a un previo desgaste por adhesión o pueden ser constituyentes duros del material de la pieza (Devillez *et al.*, 2004).

El desgaste abrasivo puede clasificarse en (Pirso *et al.*, 2011):

- Abrasión de dos cuerpos: el desgaste es causado por rugosidades duras pertenecientes a una de las superficies en contacto.

- Abrasión por tres cuerpos: se presenta cuando una partícula abrasiva de mayor dureza que las superficies de los materiales actúa como elemento interfacial entre los cuerpos en contacto.

El desgaste abrasivo predomina en el sistema si el material de trabajo posee alta dureza o contiene partículas duras, como óxidos o carburos. Estas partículas duras se deslizan sobre la superficie produciendo daño en la herramienta (Figura 7). Para que este fenómeno no se presente de forma crítica, la relación de la dureza entre las superficies en contacto no debe ser superior a 1,3 (Narváez, 2012).

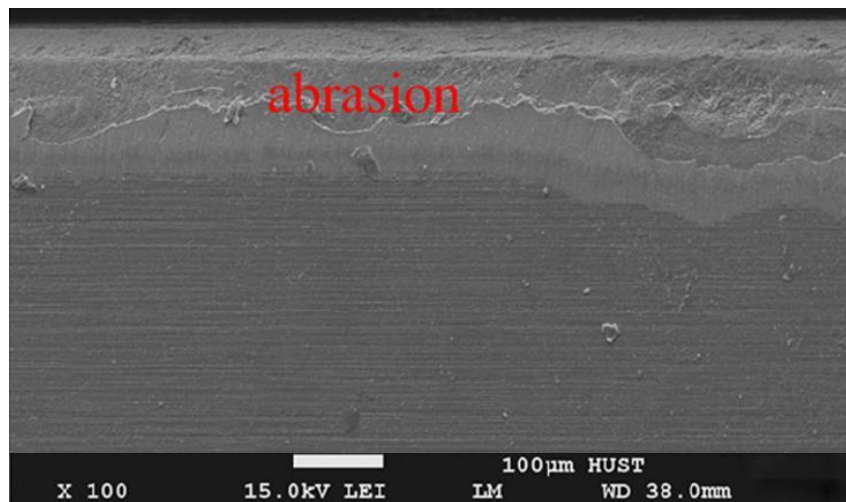


Figura 7 – SEM de la superficie de un inserto cerámico en el mecanizado con refrigeración criogénica. Desgaste abrasivo (Zhuang *et al.*, 2015)

Desgaste por difusión

La difusión en estado sólido tiene lugar cuando átomos de una red cristalina de una región de alta concentración se desplazan, en presencia de altas temperaturas, a otra región de concentración atómica más baja. Es pues un fenómeno a nivel atómico a diferencia de la adhesión que es de carácter macroscópico. Este fenómeno tiene lugar en aquellas zonas en las que hay un contacto íntimo entre dos materiales y su intensidad aumenta exponencialmente con la temperatura. En el corte, esto se traduce en un debilitamiento de la estructura superficial del material de la herramienta. La difusión hace que haya nuevos compuestos con distintas propiedades a la inicial, siendo menos resistente que la inicial (Zhuang *et al.*, 2015).

Reacciones químicas

El mecanismo de desgaste por reacciones químicas es favorecido por las altas temperaturas que se alcanzan en la interfaz pieza-herramienta. El desgaste químico puede ser debido a las reacciones químicas entre la herramienta y los reactivos de los fluidos de corte o de la pieza

mecanizada. La más común de ellas es la oxidación. La capa de óxido formada sobre el material es más blanda que éste por lo que se desprenderá de la herramienta. La repetición continua de este ciclo hace que se vayan perdiendo partículas del material de la herramienta generando por tanto el desgaste (Byers, 2006).

Deformación plástica y fatiga

La falla por deformación plástica ocurre por la aplicación de cargas superiores al límite de elasticidad del material de la herramienta, induciendo tensiones residuales en la aleación, provocando cambios microestructurales y variaciones en su dureza, sobretodo en la pieza (Yepes, 2012). Los repetidos ciclos de carga y descarga a los cuales los materiales son expuestos pueden inducir a la formación de grietas que, eventualmente, después de un número crítico de ciclos resultarán en la rotura de la superficie con la formación de grandes fragmentos (Figura 8) (Alamin, 1996). La forma y distribución de estas cargas se halla influenciada por la geometría de contacto, las propiedades elásticas y plásticas de los materiales y la intensidad de las cargas normales y tangenciales aplicadas en estas regiones (Neto *et al.*, 2013).



Figura 8 – Desgaste de la herramienta por fatiga debido a las vibraciones y ciclos térmicos (Byers, 2006)

2.1.2 Tipos de desgaste

Las herramientas de corte están sometidas a grandes esfuerzos, a altas temperaturas, al deslizamiento de la viruta por la cara de desprendimiento y al rozamiento entre la superficie mecanizada y la herramienta. Estas condiciones ocasionan un desgaste de la herramienta que disminuye su tiempo de vida útil y empeora la calidad superficial y dimensional de la pieza mecanizada (Zhu *et al.*, 2014). Los tipos de desgaste de la herramienta más comunes son:

- Desgaste en incidencia o en flanco: se origina en la superficie de incidencia de la herramienta (Figura 9). Algunas de las causas más comunes que pueden provocar este tipo de desgaste

son velocidades de corte demasiado altas, una resistencia al desgaste insuficiente de la herramienta o la falta de fluido de corte. Como resultado de este desgaste, la pieza mecanizada puede tener un acabado superficial deficiente, tolerancias fuera de las especificaciones y un aumento de la potencia necesaria en el proceso de mecanizado (Anthony y Adithan, 2009).

- Desgaste en desprendimiento o de cráter: ocurre en la cara de desprendimiento de la herramienta (Figura 9). Puede ser ocasionado por el tipo de material de la pieza (viruta abrasiva) o por el mecanismo de desgaste de difusión y reacciones químicas al alcanzar temperaturas elevadas. Consecuentemente, se produce un filo de corte débil que genera una viruta deficiente y puede llegar a provocar la rotura del filo. Además, el acabado superficial de la pieza mecanizada es deficiente y aumenta la potencia de corte necesaria (Devillez *et al.*, 2004).

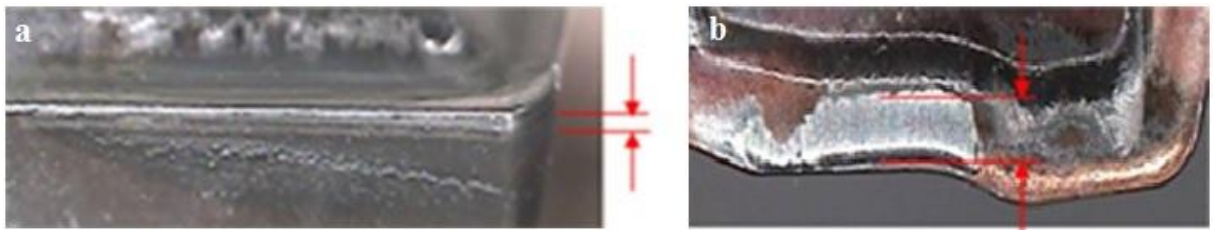


Figura 9 – Desgaste de a) incidencia en la herramienta de corte y b) desprendimiento en la herramienta de corte (Sandvik, 2007)

- Deformación plástica: depresión o impresión del filo de la herramienta de corte (Figura 10), debido a una presión y/o temperatura de corte elevada que provoca que la herramienta se deforme plásticamente o como resultado final del desgaste en incidencia y/o en cráter. El resultado del desgaste por deformación plástica es un control inadecuado de la viruta y un mal acabado superficial de la pieza de trabajo (Flores, 2015).

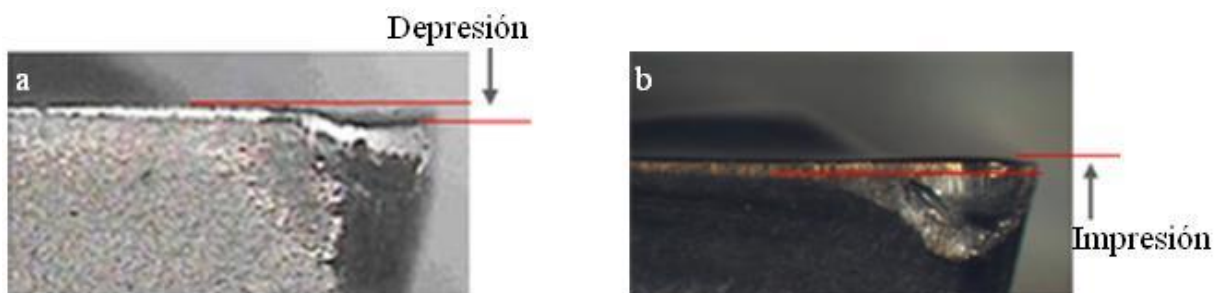


Figura 10 – Desgaste por deformación plástica en herramientas de corte: a) por depresión y b) por impresión (Sandvik, 2007)

- Astillamiento en la zona de corte: puede ser debido entre otros motivos por una falta de fluido de corte o una incorrecta elección de la herramienta. Puede ocasionar desgaste en incidencia exagerado y un acabado superficial deficiente (Figura 11) (Sandvik, 2007).

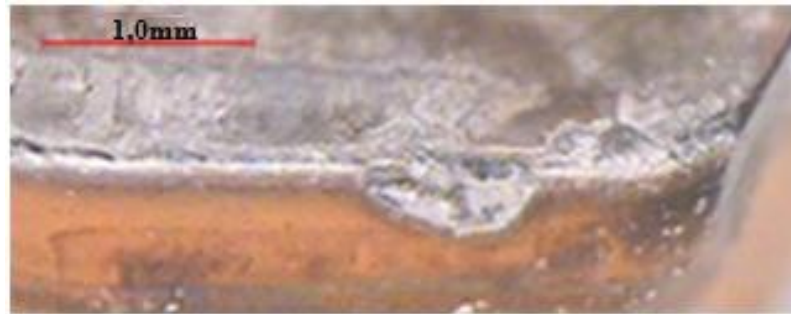


Figura 11 – Desgaste de la herramienta de corte por astillamiento (Sandvik, 2007)

- Filo recrecido (BUE) y capa adherida (BUL): algunas de las causas de este desgaste son una temperatura alta del proceso, la geometría y material de la herramienta y un caudal insuficiente de fluido de corte. Puede producir un acabado superficial inadecuado y llegar a ocasionar la rotura del filo cuando el material del filo adherido por BUE es arrancado por la viruta (Flores, 2015).
- Fisuras térmicas y por fatiga mecánica: se forman fisuras en la herramienta de corte debido a las variaciones térmicas o a las variaciones de las tensiones durante el mecanizado (Flores, 2015).

2.1.3 Fallo catastrófico de las herramientas de corte

Las causas del fallo catastrófico de las herramientas de corte suelen ser debidas a la combinación de los esfuerzos de corte y un incremento de la temperatura. Los tipos de fallos catastróficos se pueden clasificar en (Portugal, 2005):

- Fallo por fractura: falla repentina por fractura de la herramienta ocasionada por una fuerza de corte excesiva.
- Fallo por temperatura: provoca un reblandecimiento de la herramienta, deformación plástica y pérdida del filo en el borde.
- Desgaste progresivo: induce a una pérdida de la geometría de la herramienta, una reducción de la eficiencia del mecanizado y un desgaste acelerado hasta alcanzar el fallo final de la herramienta.

2.2 Lubricantes y refrigerantes convencionales

2.2.1 Introducción

Los fluidos de corte, también conocidos en inglés como *metalworking fluids* son líquidos que se usan en los procesos de mecanizado, principalmente para lubricar y refrigerar. Cumplen con funciones como reducir las fuerzas de corte por efecto de lubricación, prevenir la formación de filo recreado, ayudar a la separación y evacuación de la viruta y proteger contra la corrosión (Nouari *et al.*, 2003). Para conseguir las funciones deseadas en un lubricante es necesario el uso de aditivos como pueden ser los antidesgaste, extrema presión, anticorrosivos, modificadores del índice de viscosidad, antiespumantes, agentes complejantes y biocidas, por citar solo algunos de los más extendidos (Byers, 2006).

Es importante tanto la selección del producto adecuado como el sistema de aplicación. Algunos de los factores que se deben tener en cuenta en el sistema de aplicación del fluido de corte son el diseño y posición de la boquilla, la presión y el caudal del fluido y la presencia o ausencia de mecanismos para romper la viruta. Además, el sistema de lubricación/ refrigeración influye en el desgaste de la herramienta de corte, por lo que se debe considerar el material y recubrimiento de la herramienta (Jayal y Balaji, 2009).

2.2.2 Propiedades de los fluidos de corte

En función del proceso de mecanizado, el fluido de corte deberá tener unas propiedades determinadas para cumplir con sus funciones. Algunas de las propiedades más importantes de los fluidos de corte que se deben tener en cuenta son la estabilidad, la viscosidad, la densidad, las propiedades antidesgaste, la resistencia a la formación de espuma y la capacidad de protección contra la corrosión (Kamalakar *et al.*, 2015).

Estabilidad

La estabilidad determina la vida en servicio de los fluidos de corte. Se suelen utilizar métodos acelerados para predecir la estabilidad del producto pasado un año. Existen varios métodos estandarizados, como la ASTM D3707 o la ASTM D3709, en los que se somete el producto a unas condiciones térmicas establecidas durante un período corto de tiempo, horas o días (Byers, 2006).

En el caso de los fluidos no solubles en agua, es necesario determinar la estabilidad térmica ya que la temperatura del lubricante aumenta en el proceso de mecanizado. Además, se debe

determinar la resistencia a la oxidación ya que puede ser atacado por el oxígeno durante su uso, produciéndose una pérdida de sus propiedades (Erhan *et al.*, 2006).

Para el caso de los fluidos solubles en agua, se puede diferenciar entre la estabilidad del producto concentrado (equivalente a los fluidos no solubles) y la estabilidad de la emulsión. Los métodos para comprobar la estabilidad de la emulsión se basan en aumentar la dureza del agua, con el fin de desestabilizar la emulsión (Al-Sabagh *et al.*, 2012).

Viscosidad

La viscosidad es una de las propiedades más importantes de los fluidos no solubles en agua y, sin embargo, no es una propiedad crítica para los fluidos de base acuosa. Un aceite muy viscoso dificulta su rápida circulación y el movimiento de la herramienta. Si es demasiado poco viscoso, la película lubricante no tendrá suficiente resistencia para evitar el contacto entre las superficies móviles. Por lo tanto, en la mayoría de los casos, la viscosidad del aceite determina su uso final (Velkavrh y Mitjan, 2012).

La viscosidad puede ser medida como viscosidad dinámica o cinemática. Por un lado, la viscosidad dinámica es la medida de la resistencia del fluido a fluir en función de una fuerza externa aplicada y es independiente de su densidad. Existen varios métodos estandarizados para medir la viscosidad dinámica, como la ASTM D2983 o la ASTM D6080. En ambos métodos se utiliza el viscosímetro Brookfield para medir el par de torsión necesario para hacer girar a velocidad constante un husillo inmerso en el fluido. La viscosidad dinámica se mide en centipoise (cP) o Pascal-segundo (Pa·s) (Byers, 2006).

Por otro lado, la viscosidad cinemática mide la resistencia de un fluido a fluir bajo la acción de la gravedad y puede determinarse como la viscosidad dinámica dividida por la densidad. Uno de los procedimientos estandarizados que se usan para medir la viscosidad cinemática es la ASTM D 445. El método determina la viscosidad cinemática al medir el tiempo para que un volumen de líquido fluya por gravedad a través de un viscosímetro capilar de vidrio calibrado. La viscosidad cinemática se expresa en unidades de centistokes (cSt) y suele realizarse a dos temperaturas, 40 y 100°C (Aravind *et al.*, 2015) (Husnawan, *et al.*, 2011).

Otro parámetro que permite relacionar la viscosidad con el rango de temperaturas de trabajo, es el índice de viscosidad. Un lubricante con alto índice de viscosidad experimenta una menor variación de la viscosidad con la temperatura por lo que, en general, se desea un alto índice de viscosidad (Ting y Chen, 2011).

Propiedades antidesgaste y extrema presión

Los fluidos de corte deben garantizar la estabilidad de la película lubricante sobre la superficie en condiciones de altas cargas y temperatura, con el fin de evitar el contacto entre las superficies y el consiguiente desgaste (Matuszewska y Gradkowski, 2007). Hay un gran número de métodos para evaluar la rotura de la película lubricante al aplicar elevadas cargas. La máquina 4 bolas, el test Reichert o el control de par en un proceso de roscado son algunos de los métodos más extendidos (Byers, 2006).

Resistencia a la formación de espuma

La formación de espuma de los fluidos de corte puede originar elevados costes de operación debido a la pérdida de fluido, la reducción de la vida útil de las bombas debido a la cavitación y reduce el poder de lubricación y refrigeración. Hay varios factores a tener en cuenta aparte de la propia composición del fluido de corte como, por ejemplo, la calidad del agua, la presión y la temperatura del fluido, los contaminantes y los sistemas de filtración (Byers, 2006).

Protección contra la corrosión

La capacidad de proteger las superficies de la pieza de trabajo, de la herramienta y de la máquina-herramienta contra la corrosión debe ser evaluada; principalmente en los fluidos de corte solubles en agua. Uno de los métodos más usados para su evaluación es la Norma DIN 51360/2 que consiste en añadir el fluido de corte a unas virutas de acero sobre un papel de filtro y observar la corrosión (Denis *et al.*, 2000).

Otras propiedades de los fluidos de corte

Los fluidos de corte deben tener buenas propiedades de dispersión a fin de evitar la aglomeración de productos de oxidación, polvo, partículas y hollín. Además, es muy importante que el propio fluido no ataque a la pieza de trabajo. Aunque un fluido inicialmente no sea anticorrosivo, con su uso puede volverse corrosivo (Byers, 2006).

2.2.3 Funciones de los fluidos de corte

Los fluidos de corte son materiales de la ingeniería que permiten optimizar los procesos de mecanizado. Las principales funciones son (Carou, 2013) (El Baradie, 1996):

- Reducir la temperatura tanto de la herramienta, de la pieza de trabajo y de la viruta. Además proporciona una estabilidad térmica al sistema que permite tener un mayor control

dimensional. El desprendimiento de calor de la herramienta depende de la conductividad térmica de la herramienta, de su forma y del método de refrigeración usado (Sharma, 2009) y de la velocidad de corte. Menos del 25% de la energía total aplicada en el mecanizado es aprovechada en el proceso de mecanizado. Del 75% restante, el 50% son pérdidas caloríficas asociadas a la viruta, el 15% se asocia a la energía calórica absorbida por la pieza y el 10% restante se disipa a través de la herramienta (Figura 12) (IHOBE, 1999). La capacidad de refrigeración de los fluidos dependerá de sus propiedades físicas, como la capacidad térmica específica, la conductividad térmica o el calor de vaporización (Madanchi *et al.*, 2015).

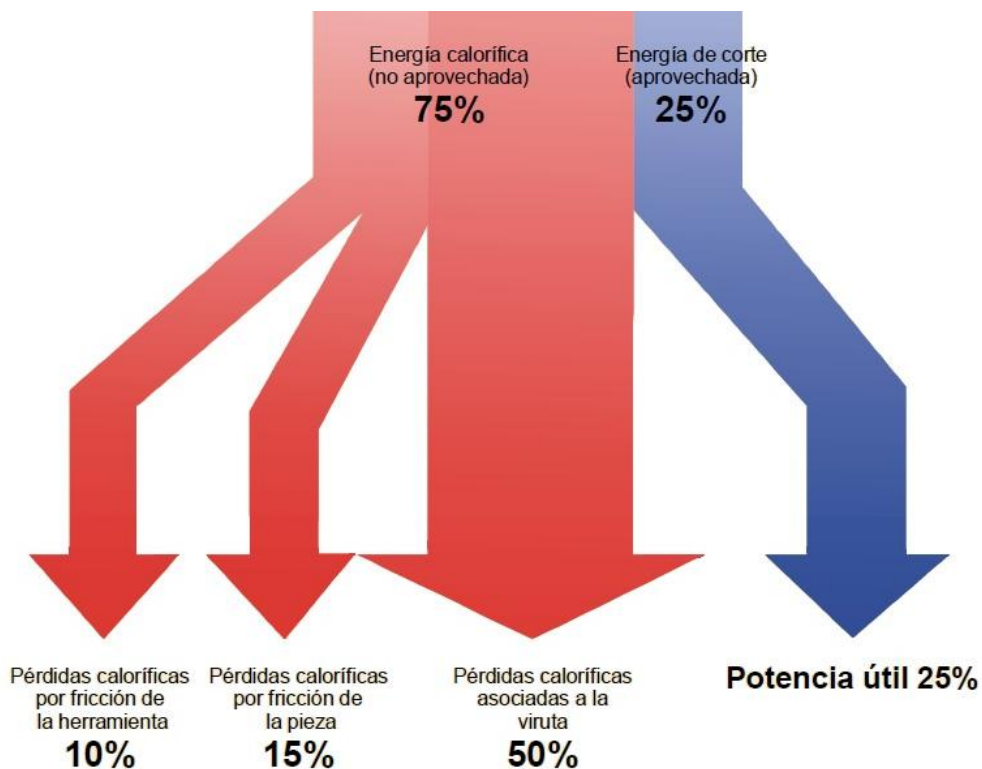


Figura 12 – Distribución de la energía consumida en los procesos de mecanizado (IHOBE, 1999)

- Reducir la fricción: los procesos de mecanizado a baja velocidad se benefician más de la lubricidad que de la refrigeración. A medida que la velocidad de corte aumenta, el desgaste por BUE disminuye, con lo que las fuerzas de corte localizadas son menores pero aumenta el calor generado. Los fluidos de corte minimizan la fricción creando una película de lubricación que varía en función del régimen de lubricación (El Baradie, 1996).
- Evacuar las virutas: transporta las virutas fuera de la zona de corte, al mismo tiempo que enfría las virutas y mantiene la suciedad y pequeñas partículas en el líquido en lugar de estar suspendidas en el aire. La capacidad del fluido para la evacuación de la viruta dependerá fuertemente de su viscosidad y de la tensión superficial (Madanchi *et al.*, 2015).

- Disminuir el desgaste de la herramienta: ayuda a prevenir la soldadura debido a la reacción del metal a altas temperaturas, a unirse a sí mismo o al filo de la herramienta en forma de filo recrecido (Byers, 2006).
- Disminuir el consumo de potencia: la mayoría de los sistemas de lubricación/refrigeración disminuyen la fricción y reducen el consumo de potencia necesaria para el mecanizado. Al mismo tiempo, si se consume menos potencia, entonces menos calor es generado.
- Proteger de la corrosión la superficie mecanizada (Carou *et al.*, 2015), además de las herramientas, los soportes y fijaciones y la máquina-herramienta (Muniz *et al.*, 2008).

Asimismo, el uso de los fluidos de corte permite aumentar la velocidad de corte, prolongar la vida útil de la herramienta, disminuir la afectación del material, alcanzar la calidad superficial requerida, y cumplir con las especificaciones dimensionales. Es decir, con los fluidos de corte se puede incrementar la productividad, mejorar la eficiencia disminuyendo el número de defectos, contribuir a garantizar la seguridad del proceso y asegurar e incrementar la calidad del mecanizado (Sokovic y Mijanovic, 2001).

Regímenes de lubricación

La lubricación es una técnica que permite la reducción del coeficiente de fricción entre dos superficies que se encuentran muy próximas y que tienen un movimiento relativo. El lubricante soporta o ayuda a soportar las presiones generadas entre las superficies. En función del espesor de la película lubricante se puede diferenciar tres zonas de lubricación (Figura 13) (ASELUBE, 2014):

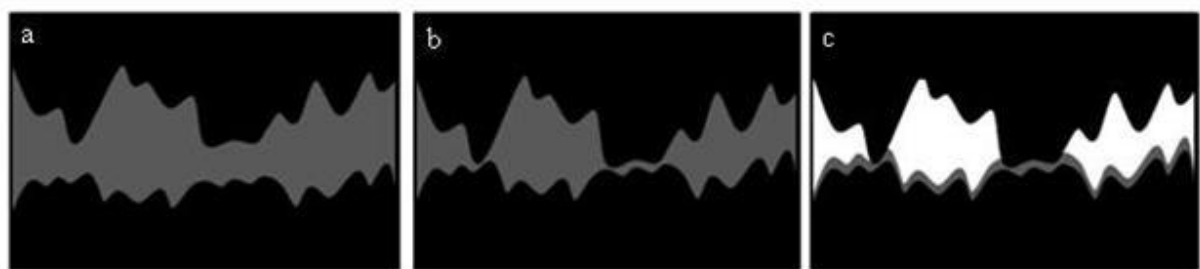


Figura 13 – Espesor de la película lubricante en los distintos regímenes de lubricación: a) lubricación hidrodinámica, b) lubricación mixta, c) lubricación límite (García, 2011)

- Lubricación hidrodinámica o fluida: las dos superficies están separadas por una película lubricante. El espesor de la película se incrementa, debido a un cambio de la velocidad de deslizamiento, a un aumento de la viscosidad o por un incremento de la presión, produciendo un incremento del coeficiente de fricción (Hong, 2006).

- Lubricación mixta: las dos superficies están parcialmente separadas, parcialmente en contacto. El espesor del lubricante disminuye respecto a la lubricación hidrodinámica, provocando un aumento del coeficiente de fricción (Hong, 2006).
- Lubricación límite: las dos superficies están mayoritariamente en contacto la una con la otra incluso aunque un fluido esté presente. Puede ser más eficaz si se incluyen aditivos que proporcionen una película más fuerte. Para condiciones suaves pueden usarse modificadores de fricción que actúan adhiriéndose en las superficies del metal, tales como compuestos orgánicos polares (ácidos grasos). La reacción del grupo polar (el carboxilo) con la superficie del metal produce una capa monomolecular muy adherente que reduce el número y área de las soldaduras metálicas (FIUBA, 2009).

La Figura 14 muestra cómo varía el coeficiente de fricción y, por tanto, el desgaste en función de la viscosidad del lubricante (García, 2011).

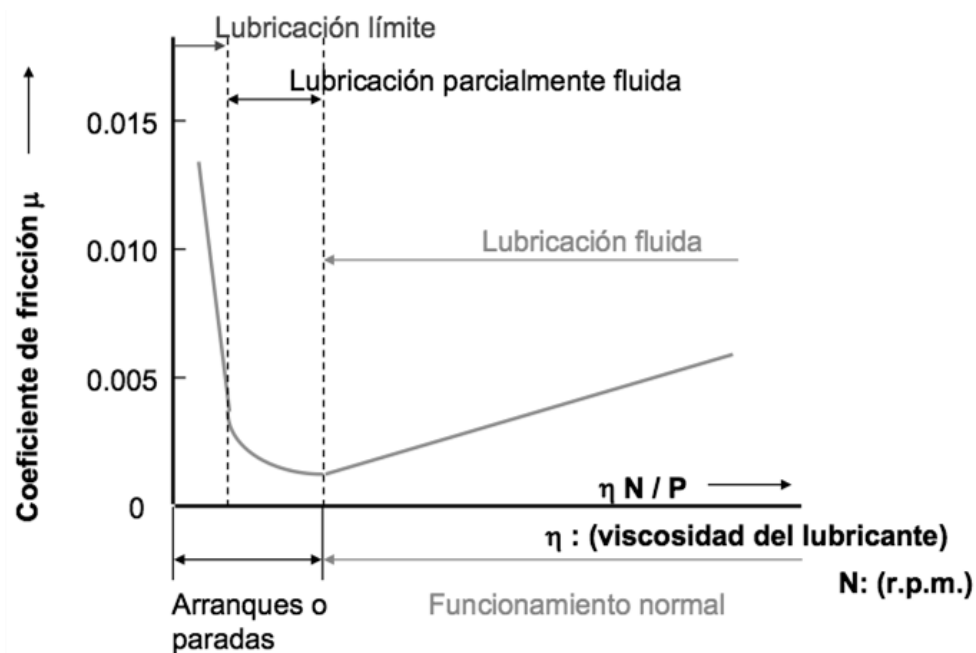


Figura 14 – Regímenes de lubricación (FIUBA, 2009)

2.2.4 Tipos de fluidos de corte

Existe una amplia variedad de fluidos de corte para poder abarcar los distintos procesos de mecanizado. Una clasificación básica de los fluidos de corte es en función de la solubilidad del fluido en agua.

Fluidos no solubles en agua

Los fluidos no solubles en agua son fluidos basados en aceite, formulados para reducir la fricción en las interfaces herramienta-pieza y herramienta-viruta. Tienen un bajo poder refrigerante con un calor específico próximo a $2,10 \text{ J}/(\text{g}\cdot^\circ\text{C})$, la mitad que el del agua, y una conductividad térmica aproximadamente una tercera parte de la del agua. Sin embargo, tienen una alta lubricidad y son resistentes a la corrosión (Debnath *et al.*, 2014).

Estos tipos de fluidos de corte son más efectivos en operaciones de baja velocidad de corte y tienden a perder su efectividad a altas velocidades. Uno de los motivos es que debido al movimiento de la viruta a estas velocidades previene que el fluido alcance la interfaz de la herramienta. Otro motivo es que a altas velocidades se generan altas temperaturas de corte y los aceites se vaporizan antes de que puedan lubricar (Groover, 2007).

Los aceites puros pueden ser aceites minerales (derivados del petróleo), de origen animal, marino o vegetales. Los derivados del petróleo son los más usuales debido a su abundancia y por sus buenas propiedades lubricantes, aunque son más caros que los de base agua. Frecuentemente, se suelen combinar dos o más aceites puros, a los cuales se les añaden aditivos para mejorar su capacidad de lubricación, obteniendo como resultado un aceite compuesto (Lawal *et al.*, 2013).

Fluidos solubles en agua

Los fluidos de corte solubles en agua o también denominados taladrinas son, generalmente, suministrados en forma de concentrados y el usuario final los diluye en agua previamente a su uso. El agua tiene un calor específico y una conductividad térmica relativamente mayor que la de otros líquidos; por esa razón, se utiliza como base de los fluidos de corte de tipo refrigerante. Estas propiedades le permiten al refrigerante extraer el calor de la operación, reduciendo así la temperatura. Sin embargo, debido al alto contenido en agua es necesario controlar la corrosión y el nivel de microorganismos (Debnath *et al.*, 2014).

Las taladrinas generalmente contienen emulsionantes que le confieren una buena capacidad de limpieza, aunque, por otro lado, pueden formar espuma. Es muy importante tener un control de la espuma ya que ésta inhibe la transferencia de calor (ISTAS, 2001). Además, no son inflamables y su tendencia a formar aerosoles es menor que la de los aceites.

Estos fluidos son más efectivos a velocidades de corte relativamente altas, donde la generación del calor y las altas temperaturas son un problema (Groover, 2007). Dentro de esta familia de productos se pueden diferenciar tres clases (Adler *et al.*, 2006):

- Aceites emulsificables: o aceite soluble/emulsión/micro-emulsión, el contenido de aceite es superior al 40%. El aceite que contiene le proporciona un mayor poder de lubricidad y una mejor protección contra la corrosión que las taladrinas con mayor contenido en agua. Son más efectivas en operaciones de mecanizado a grandes velocidades.
- Fluidos semisintéticos: emulsiones con menos del 40% de aceite, donde el tamaño de la partícula del aceite varía de 0,01 a 0,10 μm . Contienen aceite y aditivos base aceite, emulsionados en agua.
- Solución o fluidos sintéticos, son libres de aceite: tiene mayor efecto de refrigeración. A diferencia de las otras dos, no son sensibles a la dureza del agua.

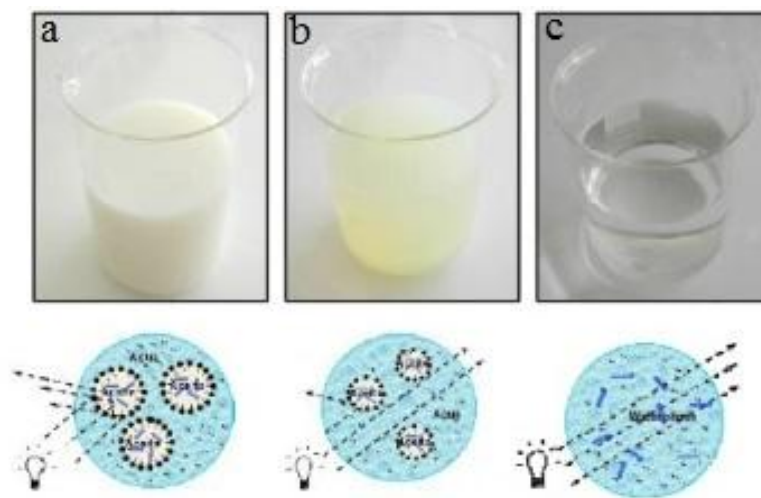


Figura 15 – Taladrinas diluidas entre el 6-10%: a) emulsión soluble y lechosa, b) semisintética, c) sintética

Como se observa en la Figura 15, los aceites emulsificables tienen un aspecto lechoso, los fluidos semisintéticos son translúcidos y las soluciones sintéticas son transparentes que permiten una buena visibilidad en la operación de mecanizado.

Los fluidos de corte pueden aplicarse a las operaciones de fabricación por varios métodos. El método de aplicación más común es por inundación. En este método se dirige una corriente constante del fluido refrigerante hacia la herramienta y la pieza de trabajo. Para ello es necesario varios componentes en el sistema, principalmente filtros para el lubricante, un sistema de recirculación, conductos y mangueras de lubricante y dispositivos de recuperación del aceite lubricante (Debnath *et al.*, 2014).

La aplicación de niebla es un método en el que el fluido se dirige hacia la zona de trabajo en forma de niebla a alta velocidad por una corriente de aire presurizado (Groover, 2007). La evaporación de las gotas de fluido suspendidas en el aire es capaz de refrigerar de manera efectiva en zonas inalcanzables con el sistema de inundación y permite una mejor visibilidad (Debnath *et al.*, 2014).

Otro método de aplicación del fluido es mediante sistemas de alta presión, para incrementar el poder de refrigeración en la zona de corte y ayudar a evacuar la viruta. El fluido de corte se suministra a una presión de 5,5 a 35 MPa a través de unas boquillas especiales (Debnath *et al.*, 2014).

2.2.5 Aditivos de los fluidos de corte

Los fluidos de corte deben ser formulados para cumplir con los requerimientos de lubricación y refrigeración. Consecuentemente, la mayoría de los fluidos de corte están formados por un producto base al que se le añaden aditivos. Los aditivos son compuestos químicos que se agregan en pequeñas cantidades y que están destinados a mejorar las propiedades del lubricante base (Brinksmeier *et al.*, 2004).

Si bien la variedad de aditivos empleados en la industria es muy extensa, es posible agruparlos en tres grandes categorías: los que modifican las propiedades de los lubricantes, los que protegen al lubricante base y los que protegen las superficies de trabajo (Husnawan *et al.*, 2011).

Aditivos que modifican las propiedades de los lubricantes

Algunos de los aditivos más usados en la formulación de los fluidos de corte para modificar sus propiedades son (Shell, 2013) (Lumar-Química, 2013):

- Los depresores de punto de fluidez y mejoradores de índice de viscosidad son compuestos orgánicos de alto peso molecular como polisobutenos, polimetacrilatos o copolímeros de oleofinas, que tienen largas cadenas moleculares. Permiten trabajar en un rango de temperaturas muy amplio manteniendo la mínima variación de su viscosidad.
- Depresores del punto de congelación: actúan disminuyendo la temperatura de fusión. Los más usados actualmente son del tipo polimérico.
- Modificadores de fricción: en función de las aplicaciones se requiere que exista una gran diferencia, o no, entre los coeficientes de fricción estático y dinámico entre piezas que alternativamente entran en contacto y están lubricadas por aceite.
- Tensioactivos y emulsionantes: reducen la tensión superficial de un líquido. Existe una gran variedad de tensioactivos que pueden proporcionar propiedades secundarias como estabilizadores o agentes espumantes.

Aditivos que protegen al lubricante base

Algunos de los aditivos más usados en la formulación de los fluidos de corte para aumentar su estabilidad son:

- **Antioxidantes:** cuando un lubricante entra en contacto con aire, inevitablemente se oxida, con una cierta velocidad que depende, básicamente, de las características del aceite y de la temperatura. Además, este proceso puede ser acelerado si hay contacto con algunos metales (cobre y hierro) que actúan como agente catalítico, o bien por presencia de contaminantes en el aceite como puede ser el agua, suciedad y partículas. Las reacciones de oxidación conducen a una degradación progresiva del aceite con formación de compuestos solubles (ácidos débiles) e insolubles (lodos, lacas, depósitos carbonosos). Los antioxidantes son compuestos capaces de retardar o prevenir los procesos de oxidación, es decir, mejoran su resistencia al envejecimiento, como por ejemplo los fenoles, las aminas o compuestos orgánicos con azufre y/o fósforo (Sánchez, *et al.*, 2010).
- **Antiespumantes:** en las condiciones de trabajo, suele ser común la presencia de aire que conduce a la formación de espuma. La presencia de espuma conlleva una reducción del poder lubricante, una disminución de la capacidad de refrigeración y una aceleración de los procesos de oxidación del lubricante. Los antiespumantes son compuestos, generalmente a base de siliconas, ésteres grasos e hidrocarburos de alto peso molecular, que reducen la tensión superficial de las burbujas facilitando su ruptura (Sokovic y Mijanovic, 2001).
- **Biocidas y fungicidas:** controlan la actividad microbiana y bacteriana de los fluidos de corte. Algunos de los biocidas más usados son las triazinas, los fenoles y los formaldehídos (Lumar-Química, 2013).

Aditivos que protegen las superficies de trabajo

Para proteger la pieza de trabajo, la herramienta y/o la máquina-herramienta se añaden aditivos a los fluidos de corte. Algunos de los más extendidos son:

- **Inhibidores de la corrosión:** protegen las superficies metálicas que pueden sufrir corrosión debido a la presencia de agua y oxígeno, mediante la formación de una capa protectora. Algunos de los compuestos más usuales son aminas y sus derivados, ácidos carboxílicos y policarboxílicos, borados, alcanolamidas de ácidos grasos y derivados de imidazolininas (Zhong *et al.*, 2004).
- **Antidesgaste:** forman una película protectora por adsorción física o química que evitan la soldadura de las superficies metálicas por ruptura de la capa lubricante. Los aditivos antidesgaste son compuestos, como los ácidos orgánicos polares o los tiofosfatos de zinc, cuyas cadenas se adhieren y se orientan perpendicularmente a las superficies metálicas, formando así una película delgada que resiste las fuerzas de cizalla (Husnawan *et al.*, 2011).

- Extrema-presión (comúnmente llamados aditivos EP): evitan las microsoldaduras de las dos superficies en contacto cuando existen cargas muy elevadas, como en el caso de los engranajes. Los principales aditivos de extrema presión son compuestos a base de cloro, azufre y/o fósforo y los sulfonatos cálcicos sódicos (Dugic *et al.*, 2013).
- Dispersantes: son compuestos orgánicos polares que previenen la aglomeración de contaminantes insolubles y evitan los residuos sobre las superficies metálicas manteniendo los productos insolubles en suspensión como partículas finamente divididas (Lumar-Química, 2013).

2.3 Lubricantes y refrigerantes alternativos

2.3.1 Mecanizado en seco

El mecanizado en seco (del inglés, *dry machining*) supone la eliminación completa del fluido de corte. En ausencia de fluidos de corte, el calor evacuado de la zona de corte es menor, resultando en un aumento de la temperatura de la herramienta y de la pieza de trabajo (Sharma, 2009). Para implantarlo se deben tener en cuenta los mecanismos de desgaste y la elección del material de la herramienta que permita asegurar su función (Standford y Lister, 2002).

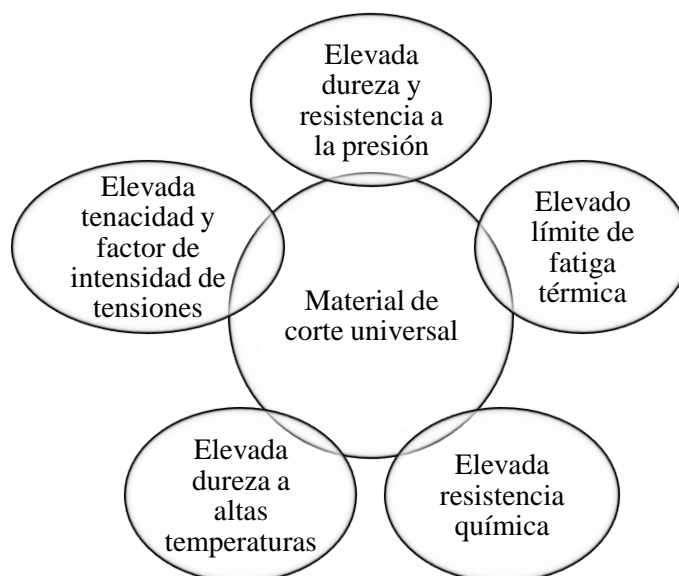


Figura 16 – Propiedades requeridas del material de las herramientas de corte para el mecanizado en seco (Siniawski y Bowman, 2009)

El material de la herramienta debe presentar elevada dureza y resistencia a la presión y temperatura, elevado límite de fatiga térmica, elevada tenacidad así como resistencia química (Figura 16) (Siniawski y Bowman, 2009). Por ejemplo, el uso de herramientas recubiertas por

deposición física de vapor, PVD (del inglés, *Physical Vapor Deposition*) o por deposición química de vapor, CVD (del inglés, *Chemical Vapor Deposition*) tienen una baja tendencia a la adhesión con el material de la pieza y una alta resistencia al desgaste (Klocke *et al.*, 2005) (Gangopadhyay *et al.*, 2010).

En general, las operaciones de mecanizado en seco son posibles cuando la pieza no requiere gran precisión dimensional y de forma, ya que depende de la cantidad de calor que recibe. Por lo tanto, resulta indispensable diseñar el proceso de mecanizado minimizando la cantidad de calor desprendido. Además, se necesitan tomar medidas especiales para garantizar que las virutas calientes se extraigan rápida y eficazmente de la zona de corte, y que se compense el calor introducido en los elementos de la máquina (Carrilero, 2002).

Una de las ventajas que ofrece el mecanizado en seco es que no hay contaminación ni en la atmósfera ni en el agua. Tampoco existen residuos en las piezas ni en las virutas, con lo que hay una reducción de costes y energía. Sin embargo, el mecanizado en seco tiene varias desventajas como la aparición de mecanismos de adhesión, generación de calor, aumento de la fricción entre la herramienta y la pieza de trabajo, y una pobre evacuación de la viruta (Carou *et al.*, 2015).

Aunque el mecanizado en seco se ha probado que funciona en numerosas operaciones, como en el mecanizado de aluminio (Dasch *et al.*, 2009) (Nouari *et al.*, 2003), actualmente, el proceso de mecanizado tiene varios desafíos, como el fresado, el torneado y el taladrado de titanio, donde se requiere el uso de fluidos de corte (Skerlos *et al.*, 2008) (Minton *et al.*, 2013) (Li, 2007).

2.3.2 *Mecanizado con mínima cantidad de lubricante*

Los sistemas con mínima cantidad de lubricante o MQL (del inglés, *Minimum Quantity Lubrication*) combinan el poder refrigerante del aire con la acción lubricante del aceite (Dudzinski, 2004). Para ello se utiliza como fluido de corte una mezcla de aire comprimido con una reducida cantidad de aceite en forma de gotas, produciendo un aerosol que es pulverizado sobre la zona de corte. El caudal de aceite¹ utilizado suele estar entre 0,01 y 0,10 l/h (Madanchi *et al.*, 2015), en lugar de los 120 l/h de aceite en el caso de los fluidos de corte convencionales. En cuanto al aceite, las presiones utilizadas normalmente oscilan entre 0,4 y 0,8 MPa, aunque hay casos en los que se ha llegado a utilizar 10 MPa (Costes, 2007).

Algunas de las ventajas del MQL frente a otras técnicas de refrigeración son: drástica disminución del uso de fluidos de corte, reducción de costes, disminución del desgaste de la herramienta, menor rugosidad superficial, aumento de la higiene industrial y mejor lubricación

¹ El caudal volumétrico en unidades del Sistema Internacional es en m³/s. 1 m³/s equivale a 3,6·10⁶ l/h.

que con el sistema de lubricación/refrigeración convencional (Boubekri y Shaikh, 2013). El fluido de corte es usado en cantidades tan pequeñas que, prácticamente, es consumido completamente en el proceso, eliminando los problemas de gestión de los fluidos de corte y, además, en las virutas producidas casi no hay restos de fluidos, con lo que son fácilmente reciclables (Jayal *et al.*, 2007). El sistema MQL puede ayudar a mejorar los resultados de la vida de la herramienta o la rugosidad superficial del proceso de torneado en comparación con el mecanizado en seco o con el uso de fluidos de corte (Carou *et al.*, 2015).

Se debe estudiar e investigar bajo qué condiciones se puede reducir el uso de fluidos de corte sin comprometer la calidad de la pieza, las limitaciones en la planificación del proceso, o los efectos medioambientales (Attanasio *et al.*, 2006). Algunas de las variables a tener en cuenta son el tipo de suministro de MQL, el material de la pieza, la operación de mecanizado, los parámetros de proceso y las operaciones subsecuentes que requiere la pieza (Weinert *et al.*, 2004).

Se conocen principalmente dos tipos diferentes de sistemas MQL: pulverizado externo o a través de la herramienta (Boubekri y Shaikh, 2013). Por un lado, el pulverizado externo consiste en un depósito del fluido de corte que se transporta a las boquillas de rociado mediante una bomba a través de conductos. La mezcla y la atomización del lubricante por efecto Venturi se producen a la salida de la boquilla. Además, el sistema puede conectarse a una unidad para regular los caudales de fluido y aire, independientemente. El consumo de lubricante es de 0,01-0,05 l/h y para obtener un flujo concéntrico y evitar la contaminación de los alrededores es necesario un flujo continuo (Boubekri *et al.*, 2010).

Por otro lado, el sistema MQL a través de la herramienta puede tener dos configuraciones en función del método en que se crea el aerosol de aceite-aire. El primero es el sistema de mezclado externo o sistema de un canal. El aceite y el aire se mezclan externamente en el depósito del equipo MQL y el flujo es conducido por un único conducto hasta la herramienta a través del husillo y el portaherramientas. Las ventajas de este sistema son su simplicidad y bajo coste. Sin embargo, el aerosol es más disperso y puede separarse durante el transporte hasta la boquilla (Galán, 2010).

La segunda configuración es la mezcla interna o sistema de dos canales. Dos conductos paralelos transportan independientemente el aceite y el aire hasta la herramienta, donde se produce la mezcla. Este sistema tiene menor dispersión pero su mantenimiento es más difícil (Boubekri y Shaikh, 2013).

El mecanizado con mínima cantidad de lubricante resulta una prometedora alternativa a los fluidos de corte, incluso en el mecanizado de piezas difíciles de mecanizar como el Inconel 718 (Zhang *et al.*, 2012). Los productos para el mecanizado con sistema MQL son, comúnmente,

alcoholes grasos y ésteres sintéticos (aceites vegetales modificados químicamente). Sin embargo, los alcoholes grasos son usados en operaciones de mecanizado donde es más importante el efecto de refrigeración que el de lubricación (Weinert *et al.*, 2004).

Los efectos medioambientales que deben ser considerados en los sistemas MQL están relacionados con el consumo de energía del compresor de gas y la presión necesaria para el suministro (Figura 17). El exceso de aplicación de MQL puede producir aerosoles, aunque a un nivel mucho menor que los fluidos de corte, incluso a niveles menores al límite de detección (Skerlos *et al.*, 2008).

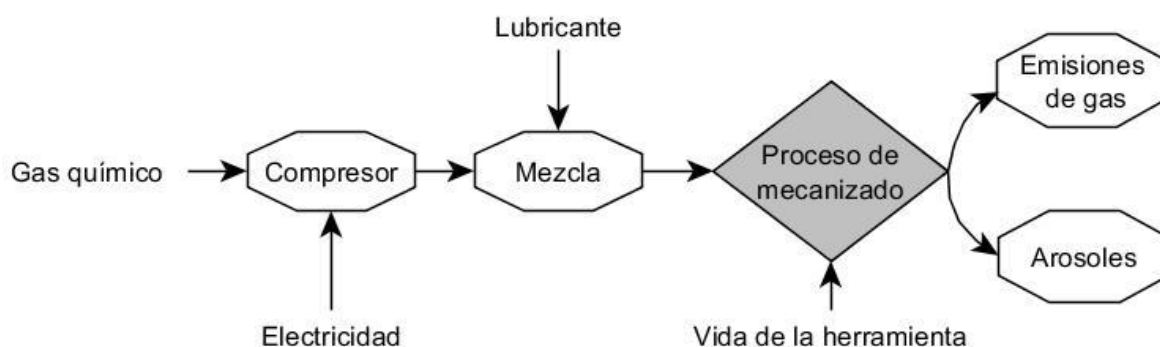


Figura 17 – Consideraciones para mejorar la sostenibilidad de los sistemas MQL (Skerlos *et al.*, 2008)

2.3.3 Lubricantes y refrigerantes sólidos

Los lubricantes y refrigerantes sólidos son materiales que se encuentran en fase sólida, como el grafito y sus estructuras alotrópicas (fulereno, nanotubos, grafeno, diamante y carbón como diamante), el disulfuro de molibdeno (MoS_2) y el disulfuro de tungsteno (WS_2). Son capaces de lubricar a temperaturas superiores a las que pueden operar los lubricantes basados en aceites. Estos materiales pueden ser utilizados hasta temperaturas de 350°C en medios oxidantes y aún más elevadas en medios reductores o no-oxidantes (el disulfuro de molibdeno hasta 1.100°C) (Morehead *et al.*, 2007).

Las propiedades lubricantes de estos lubricantes/refrigerantes se atribuyen a sus estructuras de forma laminar con fuerzas de unión débiles. Sus láminas son capaces de deslizarse unas sobre otras con muy pequeñas fuerzas de tracción, lo que les confiere las propiedades de baja fricción. Se puede aplicar en forma de recubrimiento o como aditivo en forma de partículas sólidas en aceites lubricantes (Roche *et al.*, 2012). Aunque mayoritariamente son utilizados en la industria aeroespacial, también son aplicables en la industria del mecanizado. La combinación de grafito con la tecnología MQL es una buena alternativa a los fluidos de corte convencionales en el proceso de rectificado. Con bajas concentraciones de grafito, se puede disminuir la temperatura del proceso y aumentar la vida de la herramienta (Tsai y Jian, 2012).

2.3.4 *Lubricantes y refrigerantes criogénicos*

La lubricación y refrigeración criogénica consiste en la utilización de materiales criogénicos, como el nitrógeno líquido (LN₂) a -196°C o el dióxido de carbono líquido (CO₂) a -78°C, como soporte durante la mecanización. El refrigerante criogénico se inyecta en la zona de corte y permite, de forma eficiente, mantener la temperatura de la herramienta por debajo de la temperatura de reblandecimiento. El nitrógeno líquido absorbe el calor, se evapora rápidamente y forma una capa de gas fluido entre la viruta y la cara de la herramienta, actuando como lubricante (Irani, 2005).

Los refrigerantes criogénicos se pueden aplicar mediante distintos métodos (Carou, 2013): preenfriamiento criogénico de la pieza de trabajo, enfriamiento criogénico indirecto, enfriamiento criogénico mediante spray y chorro, y por tratamiento criogénico.

En la mayoría de los casos es un sistema que resulta caro. Tanto el nitrógeno líquido como el CO₂ son productos básicos, pero se necesitan equipos especiales para alcanzar las temperaturas de -196°C y -78°C para el nitrógeno líquido y el CO₂, respectivamente (Irani, 2005). Sin embargo, a pesar del elevado coste de los equipos, se presenta como una alternativa que puede ser de interés particularmente en operaciones especiales y operaciones donde el coste de la herramienta es elevado. Por ejemplo, el uso del CO₂ líquido es muy eficaz para reducir el desgaste de cráter en las herramientas de carburo en el mecanizado de aleaciones de titanio, superaleaciones austeníticas de base níquel, cromo y molibdeno, y otros materiales difíciles de mecanizar (El Baradie, 1996). El sistema a alta presión usa un caudal de 18 l/h, obteniendo mejores resultados de el alargamiento de la vida de la herramienta que con el sistema de subenfriamiento que usa un caudal de 57 l/h (Hong y Broomer, 2000).

La refrigeración criogénica mediante el uso de LN₂ es un sistema que no deja ningún residuo dañino al medio ambiente. Después de absorber el calor del proceso de mecanizado, el fluido se evapora en nitrógeno gas y pasa a formar parte del aire (teniendo en cuenta, que el 79% del aire es nitrógeno) (Hong y Broomer, 2000).

2.3.5 *Lubricantes y refrigerantes gaseosos*

Los lubricantes y refrigerantes gaseosos son sustancias que a temperatura ambiente están en estado gaseoso. El aire es uno de los gases más empleados, aunque tiene una baja capacidad refrigerante que puede ser incrementada mediante su enfriamiento. Otros gases usados son el argón, helio y nitrógeno que se utilizan para prevenir la oxidación de la pieza y la herramienta (Shokrani *et al.*, 2012). Sin embargo, como en el caso de la lubricación criogénica, el alto coste

de estos gases generalmente no los hace rentables para aplicaciones en la producción (Najiha *et al.*, 2016).

También se ha probado mediante la ionización de aire presurizado aplicado en la zona de corte, en la que el aire a presión cumple con las funciones refrigerantes y su ionización con las funciones lubricantes a través de la oxidación que produce en la zona puntual de mecanizado (Costes, 2007).

2.3.6 *Lubricantes y refrigerantes sostenibles*

El reto medioambiental, que está dando lugar a múltiples vías de investigación, es uno de los principales campos de crecimiento para el mercado de lubricantes. Una de las tendencias más importantes es el uso de nuevas formulaciones de fluidos de corte sostenibles con el medio ambiente. Por un lado, el mercado está explorando la utilización de aceites con base de origen vegetal o sintético y biodegradable, frente a la formulación de aceites minerales medioambientalmente más negativos (Assenova *et al.*, 2012).

Por otro lado, existe una tendencia a la eliminación o reducción de las sustancias peligrosas en la formulación de los fluidos de corte. Entre ellas, la reducción del uso de nitrito sódico como inhibidor de la corrosión, la reducción del nivel de aromáticos y la utilización de aditivos más biodegradables, la eliminación del uso de metales pesados en las formulaciones, el uso racionalizado de biocidas o la reducción del uso de lubricantes miscibles en agua (IHOBE, 1999).

Para dar mayor importancia a los productos sostenibles, instituciones de varios países han desarrollado etiquetas especiales con el objetivo de promover el consumo de lubricantes sostenibles (Assenova *et al.*, 2012). Las etiquetas ecológicas son sistemas de etiquetado de productos y una forma de medición de la sostenibilidad de los productos dirigida a los consumidores. Las etiquetas hacen valer el cumplimiento de un conjunto de prácticas con los requisitos mínimos de sostenibilidad o de reducción de daños hacia el medio ambiente. Algunos ejemplos de etiquetas ecológicas se pueden observar en la Tabla 1, siendo la etiqueta Blue Angel una de las más antiguas (1988).

Tabla 1 – Etiquetas ecológicas de diferentes continentes y países (EPA, 2011)

Etiqueta ecológica	Región
Blue Angel	Alemania
Swedish Standard	Suecia
Nordic Swan	Noruega, Suecia, Finlandia, Islandia, Dinamarca
NF Environment mark	Francia
Green Seal	EEUU
Environmental choice	Canadá
EU Ecolabel	Europa
Earth friendly mark	Japón
Green Label	Singapur

El término biolubricante se aplica a todos los lubricantes que son biodegradables y que no son tóxicos ni para los seres humanos ni para el medio ambiente. A partir de esta definición se pueden diferenciar distintas alternativas. Por un lado, los lubricantes respetuosos y compatibles con el medio ambiente que tienen un bajo impacto o un impacto nulo sobre la naturaleza y su entorno (Norrby, 2003) y, por otro lado, los lubricantes respetuosos con el medio ambiente o EALs (del inglés, *Environmentally Acceptable Lubricants*). Estos últimos son lubricantes adaptados para minimizar los daños y riesgos en la naturaleza, donde se identifica los criterios de biodegradabilidad, toxicidad, contenido relativo de materiales renovables, desempeño funcional y ciclo de vida medioambientalmente favorable (Brinksmeier *et al.*, 2015).

Hay una gran variedad de fluidos base que pueden usarse como alternativas a las bases minerales como ésteres sintéticos, polialquilenglicoles, productos basados en aceite vegetal, polialfaolefinas, aromáticos alquilados, polibutenos (Nagendramma y Kaul, 2012), y el uso de fluidos con polímeros (Winter *et al.*, 2015).

Varios estudios demuestran que los fluidos de corte con base aceite vegetal pueden ser una buena alternativa a los fluidos convencionales (Tabla 2) (Erhan *et al.*, 2006) (Shashidhara y Jayaram, 2010) (Anthony y Adithan, 2009) (Lawal *et al.*, 2012). Los aceites vegetales tienen excelentes propiedades de lubricidad, biodegradabilidad, características viscosidad-temperatura y baja volatilidad. La baja estabilidad térmica y oxidativa de los aceites vegetales puede ser mejorada usando una combinación de aditivos químicos, polialfaolefinas y aceites vegetales con alto contenido de oleico (Erhan *et al.*, 2006).

Tabla 2 – Ventajas e inconvenientes de los aceites vegetales como lubricantes (Shashidhara y Jayaram, 2010) (Anthony y Adithan, 2009) (Lawal *et al.*, 2012)

Ventajas	Inconvenientes
Elevada biodegradabilidad	Baja estabilidad térmica
Baja contaminación del ambiente	Estabilidad oxidativa
Compatibilidad con los aditivos	Elevados puntos de congelación
Bajo coste de producción	Baja protección de la corrosión
Amplia posibilidad de producción	
Baja toxicidad	
Elevados puntos de inflamación	
Baja volatilidad	
Altos índices de viscosidad	

Los triglicéridos son los constituyentes principales de los aceites vegetales. Tienen una estructura molecular con tres cadenas de ácidos grasos de 14 a 22 átomos de carbono. Las cadenas largas de ácidos grasos aportan una fuerte película de lubricación que interactúa fuertemente con la superficie metálica, reduciendo tanto la fricción como el desgaste. Por lo tanto, son particularmente efectivos en la lubricación límite debido a su elevada polaridad que tiene fuerte interacción con las superficies lubricadas (Lawal *et al.*, 2012). Por ejemplo, en el proceso de torneado de un acero inoxidable usando aceite de coco puede obtenerse una mejor rugosidad superficial y una disminución del desgaste de la herramienta que con un fluido convencional (Anthony y Adithan, 2009).

Los aceites vegetales, especialmente el aceite de colza, el aceite de colza canadiense y el aceite de palma son algunos de los candidatos más prometedores como sustitutos de los aceites base petróleo. Son aceites ecológicos y fácilmente biodegradables (Lawal *et al.*, 2012).

El aceite de cacahuete y el aceite de melón pueden ser usados como refrigerantes en operaciones de torneado. Los resultados muestran que el aceite de melón tiene mayor poder de refrigeración y mayor acabado superficial que el de cacahuete, aunque tienen menor capacidad de refrigeración que los aceites convencionales. Además, la viruta formada con los aceites vegetales es continua y más dúctil que las originadas con aceites solubles y mecanizado en seco. Estos aceites vegetales pueden alargar más la vida de la herramienta que los aceites convencionales, por lo que pueden ser una buena alternativa a los aceites solubles (Adekunle *et al.*, 2015).

No solamente se han hecho estudios de aceites vegetales en aplicaciones por inundación, sino también en aplicaciones de mecanizado con mínima cantidad de lubricante. Uno de los casos, es el estudio del taladrado a alta velocidad de aleaciones de titanio empleando un sistema de lubricación/refrigeración MQL con aceite de palma. Los resultados muestran que los aceites vegetales como fluidos de corte son un buen potencial en el mecanizado de superaleaciones (Lawal *et al.*, 2012).

Otro caso de estudio es el fresado de acero inoxidable (AISI 420) con herramientas recubiertas de carburo cementado (TiAlN). A una velocidad de corte de 60 m/min, el aceite de palma y el alcohol graso permiten alargar la vida útil de la herramienta. En la Figura 18 se observan tres regiones de desgaste: 1) primario, 2) normal o secundario, y 3) acelerado. En la primera región, de desgaste primario, la herramienta experimenta un rápido desgaste al entrar en contacto con la pieza. En la segunda, de desgaste normal o secundario, se mantiene una velocidad de desgaste estable. Y, finalmente, en la tercera región, de desgaste acelerado, hay una pérdida de la eficiencia del corte que acaba produciendo el fallo de la herramienta. Para el aceite de palma y el alcohol graso el desgaste de la herramienta es gradual, mientras que para el mecanizado en seco o con fluidos de corte convencionales por inundación, el desgaste de la herramienta es más rápido (Sharif *et al.*, 2009).

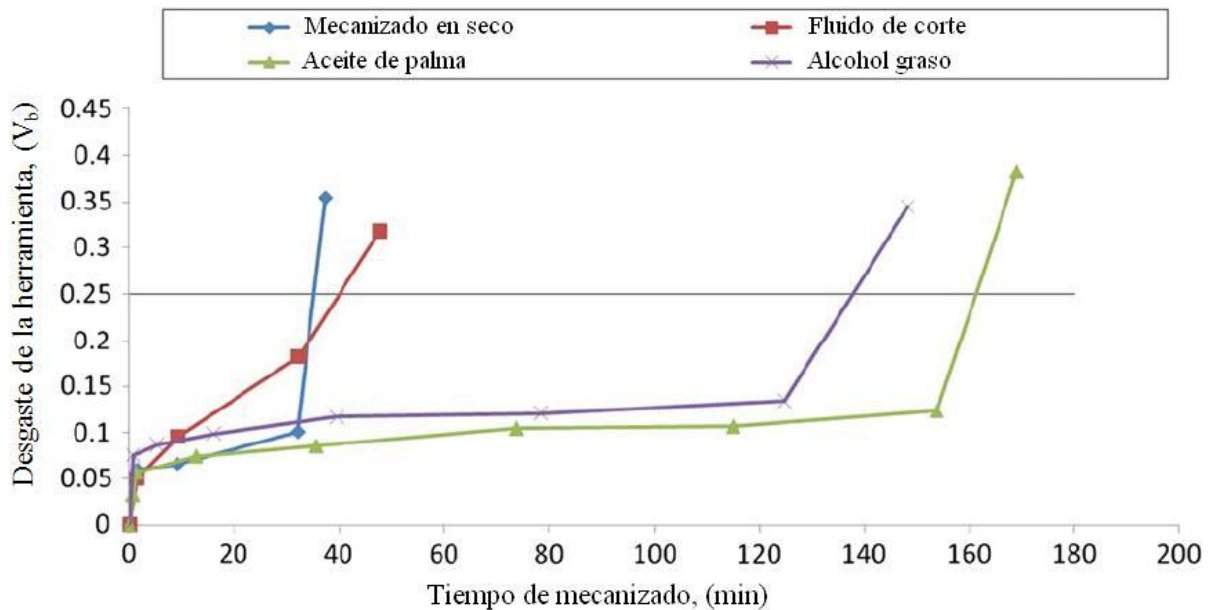


Figura 18 – Desgaste de la herramienta usando distintas condiciones de refrigeración (Sharif *et al.*, 2009)

2.3.7 Nanofluidos

Los nanofluidos son fluidos con dispersiones coloidales de nanopartículas como, por ejemplo, óxido de cobre, disulfuro de molibdeno, óxido de aluminio o grafenos, en escala nanométrica. La base de los fluidos más empleado es el agua, el etilenglicol y el aceite. Los análisis físicos de los nanolubricantes demuestran que la dispersión de las nanopartículas pueden penetrar fácilmente la superficie, ayudando a incrementar la capacidad de transferencia de calor y mejorando las propiedades tribológicas de los actuales fluidos (Debnath *et al.*, 2014).

Una barrera a la aplicación industrial de los nanofluidos es la viscosidad. Al añadir las nanopartículas al fluido base se está incrementando tanto su conductividad térmica como su viscosidad. Otra barrera son los elevados costes de la tecnología de los nanofluidos que está en desarrollo. En la última década, ha habido un interés creciente en los nanofluidos como alternativa a los fluidos de corte (Najjha *et al.*, 2016).

CAPÍTULO 3. REVISIÓN ECONÓMICA

3.1 Mercado de los lubricantes

Al observar las cifras de consumo de lubricantes, resulta clara su importancia en la actividad industrial. Como consecuencia del desarrollo de lubricantes de altas prestaciones y que sirven para una mayor variedad de aplicaciones, las empresas tienden a consumir menos cantidad de fluidos (Terradillos y Ciria, 2014).

El consumo global de lubricantes en el año 2014 fue de 36,4 millones de toneladas y se espera alcanzar los 43,9 millones de toneladas en 2022, lo que supone una tasa de crecimiento anual compuesto o CAGR (del inglés, *Compound Annual Growth Rate*) del 2,4%. Aproximadamente el 85% de los fluidos de corte usados son de base mineral. Sin embargo, los valores estimados difieren mucho debido a diversidad y la naturaleza generalizada de los procesos (Debnath *et al.*, 2014).

El mercado de lubricantes está relativamente fragmentado. En la Figura 19 se puede observar la distribución de la demanda por región en el año 2014 y en la Figura 20, la distribución de la demanda por producto y región de los lubricantes en el año 2013 (Statista, 2016).

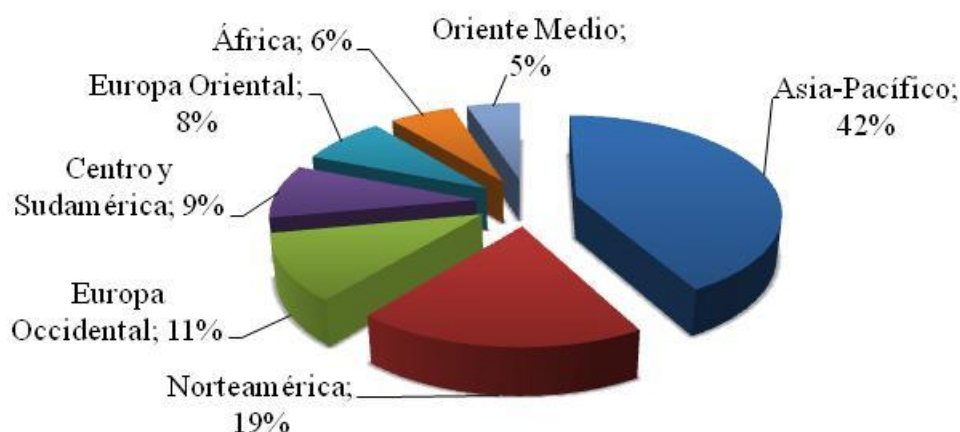


Figura 19 – Distribución de la demanda de lubricantes global por región del año 2014 (Statista, 2016) (Tocci, 2016)

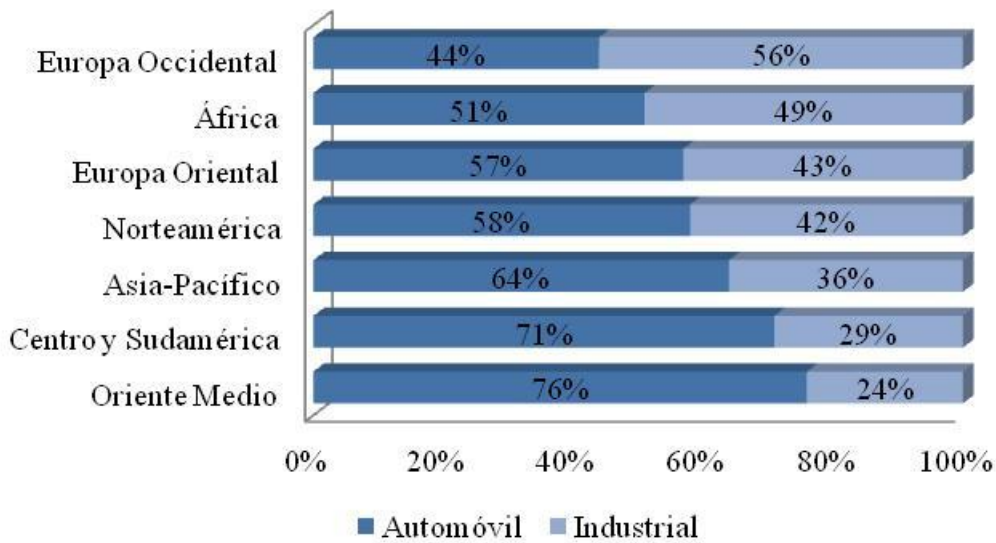


Figura 20 – Distribución de la demanda global por región y producto del año 2013 (Statista, 2016)

El mercado de los lubricantes industriales puede segmentarse en varios tipos teniendo en cuenta su función, siendo algunos de los más empleados los lubricantes para engranajes, los lubricantes hidráulicos y los aceites de motor (Future market insights, 2016). Los fluidos de corte representan alrededor del 5% del mercado global de lubricantes, siendo Asia el principal consumidor (Figura 21) (Grand View Research, 2016).

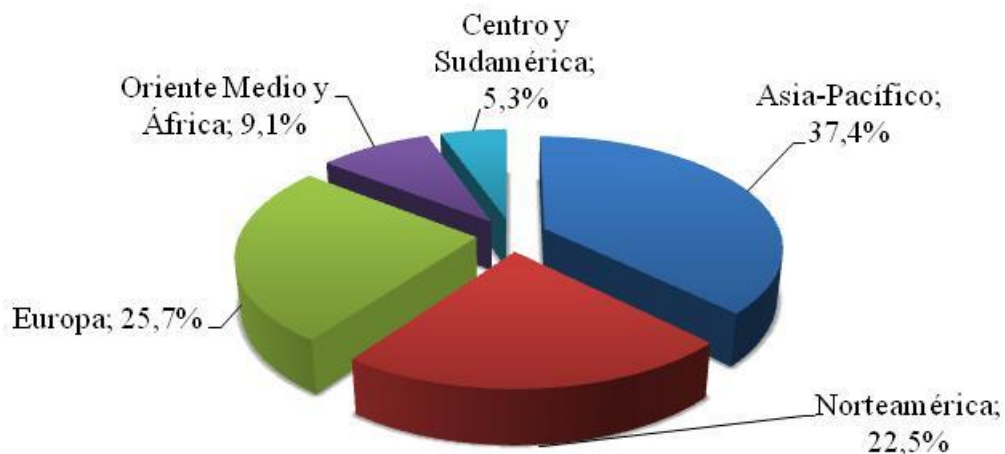


Figura 21 – Demanda global de fluidos de corte por regiones en 2014 (Grand View Research, 2016)

Los mayores mercados de lubricantes son EEUU, Rusia, China, Japón, Alemania e India. En Europa Occidental, existen alrededor de 300 fabricantes, teniendo en cuenta que en todo el mundo existen en torno a 1.700, de los cuales, unas 1.500 son compañías independientes y unos 200 están integradas en grandes compañías nacionales e internacionales (Terradillos y Ciria,

2014). La globalización del mercado, clientes y suministradores ha provocado una globalización en la industria de los lubricantes. Como consecuencia, hay un aumento en la competitividad y la concentración de la mayor parte de los clientes en solo unos pocos suministradores. Así, por ejemplo, varias compañías petrolíferas han tenido que fusionarse para poder ser más competitivas como Shell y Pennzoil, BP y Castrol, Exxon y Mobil (Terradillos y Ciria, 2014).

Las diferencias en tamaño entre fabricantes son muy notables. El mercado global de lubricantes está fragmentado por siete compañías líderes que abarcan más del 60% de la demanda: Shell, ExxonMobil, BP, Chevron, Total, PetroChina y Sinopec (Figura 22) (Grand View Research, 2016).

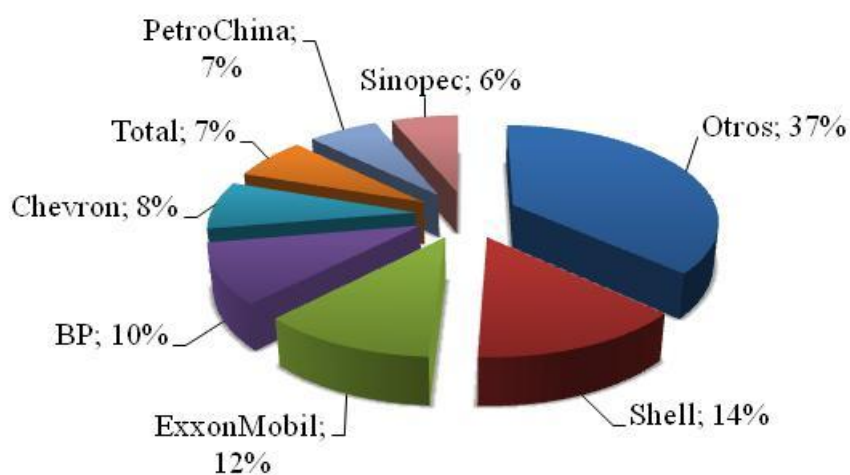


Figura 22 – Estructura del mercado global de lubricantes en 2014 (Townsend, 2016)

3.1.1 Mercado de los aditivos

El mercado de los aditivos está dominado por cuatro compañías que ocupan entre el 85-90% del mercado global (IHS, 2015): Chevron Oronite, Afton Chemical Corporation, Lubrizol Corporation e Infineum.

Se espera una tasa de crecimiento anual compuesto (CAGR) del 1,6% durante el período 2014 a 2019, debido a la demanda de lubricantes de mayores prestaciones. En la Figura 23, se estima la evolución de la demanda de lubricantes en miles de toneladas durante el período 2014 hasta el 2024 en EEUU. Los aditivos con mayor CAGR son los antioxidantes, los mejoradores del índice de viscosidad, los dispersantes y los modificadores de fricción (Townsend, 2016)

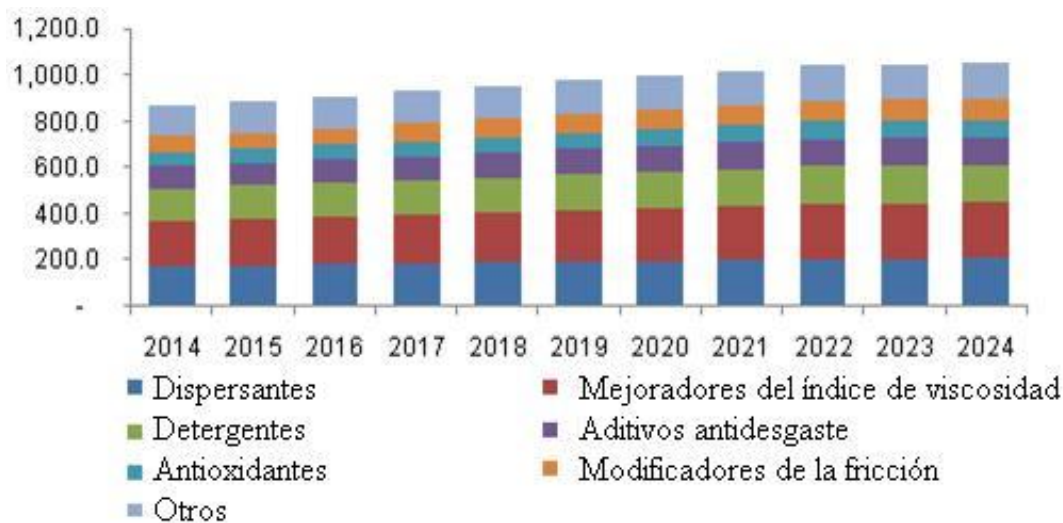


Figura 23 – Predicción del volumen de mercado de aditivos para lubricantes en EEUU en el período, 2014 - 2024, (en miles de toneladas) (Grand View Research, 2016)

3.1.2 Mercado de lubricantes sostenibles

El estudio de mercado realizado por Transparency Market Research estima que la tasa de crecimiento anual compuesto de los biolubricantes durante el período 2012-2018 es del 6,6%, mientras que para los lubricantes sintéticos es de 2,48%. La demanda de biolubricantes fue de 0,40 y 0,60 millones de toneladas en los años 2011 y 2014 (Figura 24), respectivamente, y se espera una demanda de 0,79 millones de toneladas de biolubricantes para el 2018 (Debnath *et al.*, 2014).

En comparación con la tasa de crecimiento anual estimada del 2% del mercado de EEUU de lubricantes, se espera un crecimiento del 7 al 10% para los lubricantes respetuosos con el medio ambiente. El 75% de los biolubricantes están basados en aceites vegetales, mayoritariamente el aceite de ricino, de soja y de palma (Umejei, 2016).



Figura 24 – Mercado global de biolubricantes en 2014 en millones de toneladas (Umejei, 2016)

3.1.3 Mercado español

La ASELUBE (Asociación Española de Lubricantes) engloba las 18 compañías más significativas del sector de lubricantes en España; que representan aproximadamente el 84% del volumen de ventas totales en el mercado español. Estas firmas representadas por ASELUBE facturaron en el sector de la lubricación durante 2014 más de 1.113 millones de euros y las ventas de lubricantes en el mercado español durante este período se estiman en 366.000 toneladas, lo que supone un crecimiento anual de 2.9%. En la Figura 25 se puede observar la estructura de las ventas en España del año 2014.

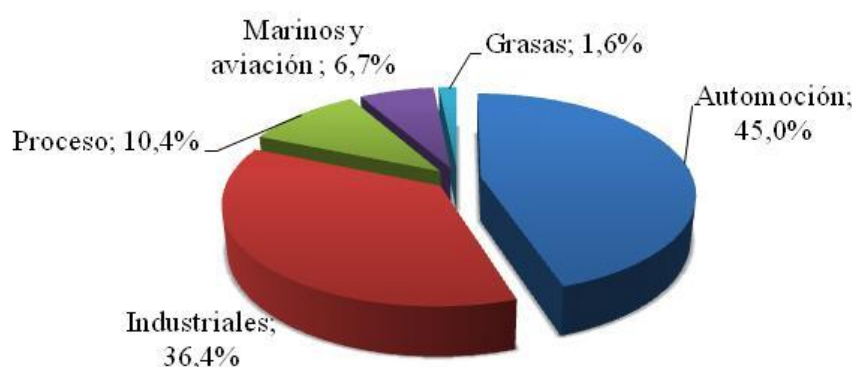


Figura 25 – Estructura de las ventas de lubricantes en España (ASELUBE, 2014)

3.2 Evaluación de los costes en los lubricantes y refrigerantes convencionales en el mecanizado

El coste del proceso de mecanizado depende fuertemente de la tasa de eliminación de material o MRR (del inglés, *Material Removal Rate*), pero aumentar el MRR conlleva una menor vida útil de la herramienta debido al aumento de la fricción y la generación de calor en la zona de corte de la herramienta (Sharma, 2009). En este sentido, Winter y sus colaboradores (2015) han estudiado el proceso de rectificado, identificando cómo influye la composición de los fluidos de corte sobre la relación entre el ratio de eliminación de material, el consumo de energía y la calidad superficial alcanzada.

Aparte de los parámetros de corte y las propiedades de la pieza de trabajo, hay tres factores más para mejorar los requerimientos tecnológicos, el impacto medioambiental y el económico que son: la herramienta, la máquina-herramienta y los fluidos de corte (Winter *et al.*, 2014). Sin embargo, no todos los factores pueden cambiarse o modificarse fácilmente.

Los fluidos de corte proveen numerosas ventajas en el proceso de mecanizado, pero también existen varios inconvenientes que suponen un sobrecoste en el proceso productivo (Tabla 3)

(Hubbard *et al.*, 2008) (ISTAS, 2001). Si además de estas consideraciones se añade que la legislación medioambiental es cada vez más estricta, surge la necesidad de desarrollar nuevos sistemas de lubricación/refrigeración menos costosos para el proceso productivo y nuevas herramientas de corte que permitan reducir la fricción y, por tanto, la temperatura del proceso.

Tabla 3 – Ventajas e inconvenientes de los fluidos de corte en el proceso de mecanizado (Hubbard *et al.*, 2008)

Ventajas	Inconvenientes
Aumento de vida de la herramienta	Costos de adquisición, almacenamiento, mantenimiento y eliminación de residuos
Reducción de las fuerzas de mecanizado y potencia	Pueden ocasionar daños a la pieza y máquinas-herramienta debido al paso del tiempo y un mal mantenimiento
Permite trabajar a velocidades más altas	Efectos negativos sobre el medio ambiente
Reduce o elimina las fuerzas vibratorias	Riesgos para la salud del operario
Reduce o elimina la necesidad de tratamientos térmicos posteriores	
Mejora la calidad de la pieza	

Heine (1998) reporta que el coste de los sistemas de lubricación/refrigeración representa entre un 7,5 y un 17% de los costes totales de fabricación, frente al 4% del coste de las herramientas. Sreejith y su equipo (2000) estiman que los costes de lubricación ascienden a un 16-20% de los costes de producción. Posteriormente, Weinert y sus colaboradores (2004) valoran los costes de lubricación/refrigeración entre un 7-17%. Estudios más actuales muestran que los costes de lubricación/refrigeración en la industria del automóvil ascienden a un 16-18% frente a un 7-8% de los costes de las herramientas (Figura 26) (Sánchez *et al.*, 2010). En la Figura 27 se presenta la estructura de costes de fabricación de los árboles de levas para la industria de automoción alemana (Najih *et al.*, 2016). Así, se observa que los costes de aplicación de los fluidos de corte se estiman en el 16,9%.



Figura 26 – Estructura de los costes de fabricación para la producción de los árboles de levas de la industria de automoción alemana (Najih *et al.*, 2016)

Para hacer un correcto análisis se representa en la Figura 27 la relación entre la maquinaria y los procesos del mecanizado, así como los procesos derivados entre los que se halla la limpieza de la pieza, la filtración de los fluidos de corte, el sistema de extracción y filtrado del aire y el sistema de reciclaje. Además de los fluidos de corte será necesario evaluar el consumo de energía y agua imprescindibles para la operación de mecanizado (Dahmus y Gutowski, 2004).

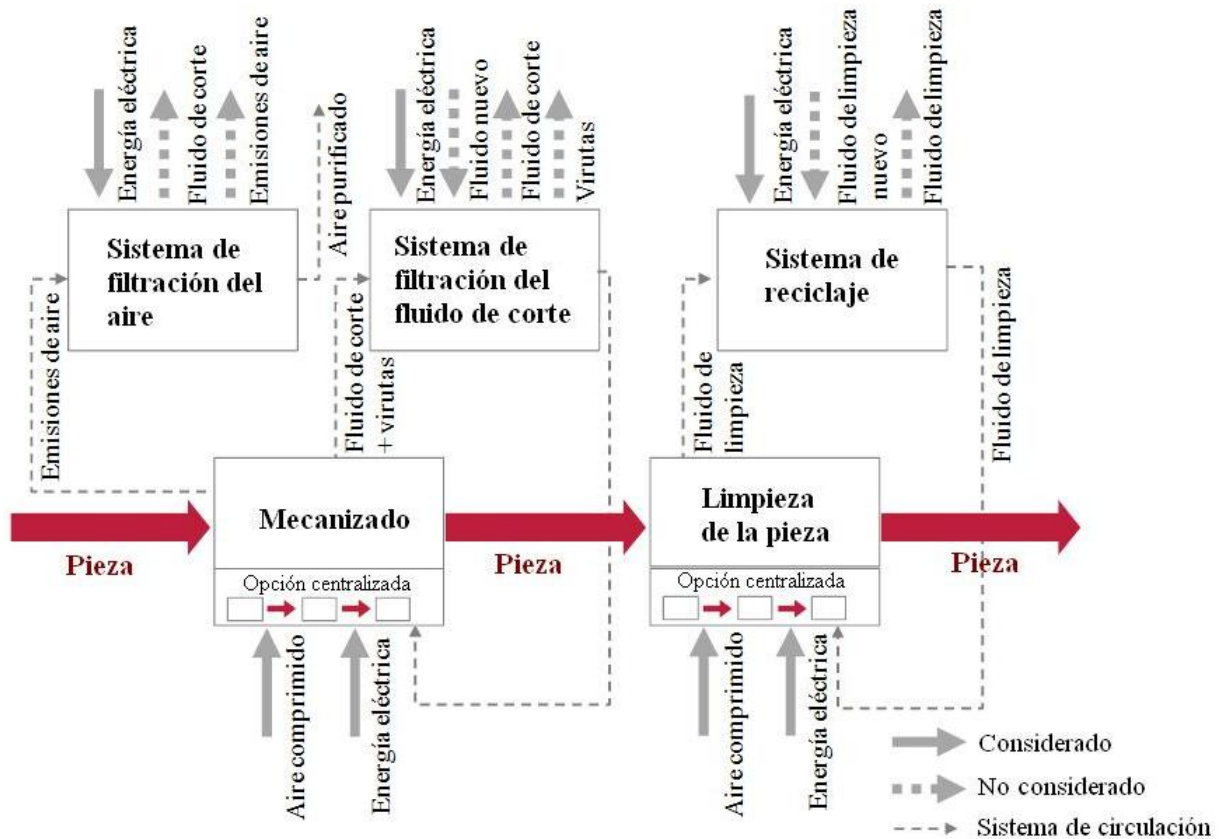


Figura 27 – Relación entre la maquinaria y los equipos, y el flujo de material y energía en la cadena de proceso con uso de fluidos de corte (Madanchi *et al.*, 2015)

En la evaluación de los costes de los sistemas de lubricación y refrigeración mediante fluidos de corte hay que tener en cuenta los siguientes factores (Hubbard *et al.*, 2008):

- El coste de compra del fluido de corte: la mayoría de los fluidos de corte se formulan mediante productos derivados del petróleo por lo que su coste está condicionado por la evolución del precio del crudo. Así, es interesante destacar la variabilidad del precio del crudo en los últimos años (Figura 28). En parte, esto explica las posibles variaciones del precio de los fluidos de corte.

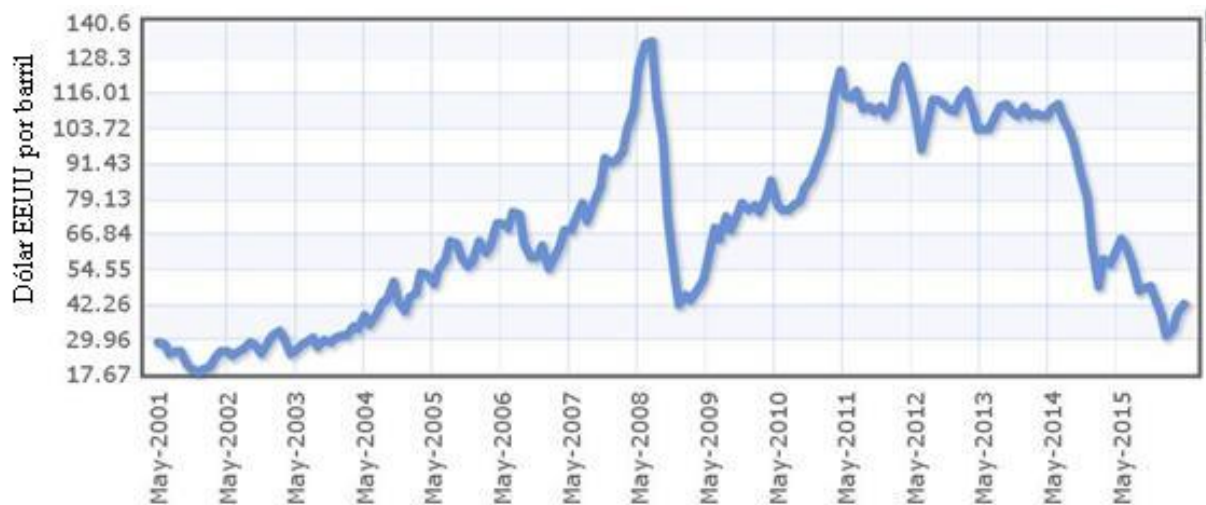


Figura 28 – Evolución del precio del crudo del petróleo (EIA, 2016)

- Los costes de limpieza de la pieza de trabajo: operaciones secundarias con el objetivo de eliminar la película lubricante de la superficie. Para evitar la contaminación dentro del proceso es necesario limpiar la pieza entre distintas operaciones de mecanizado, distintos procesos o al final del proceso de fabricación (Madanchi *et al.*, 2015).
- El coste del agua con la que se diluye los productos concentrados de los fluidos de corte. Éstos pueden variar mucho según la calidad del agua requerida por el producto.
- Los costes asociados con la sustitución por pérdidas de fluido debido al arrastre de fluido tanto de las virutas como de la pieza de trabajo y a las pérdidas por evaporación, el fluido debe ser rellenado para alcanzar la concentración y el nivel requerido (Sokovic y Mijanovic, 2001).
- Los costes de mantenimiento asociados con el uso de aditivos para prolongar la vida del fluido se deben controlar y añadir los aditivos necesarios para controlar el sistema, como bactericidas o las soluciones reguladoras de pH.
- Los costes de tareas de mantenimiento asociados con el trabajo necesario para bombear, limpiar y rellenar el sistema de lubricación/refrigeración.
- Los costes de eliminación y tratamiento del fluido agotado. El crecimiento de la legislación asociada con la contaminación y el tratamiento de los fluidos residuales, como las regulaciones de la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos o EPA (del inglés, *Environmental Protection Agency*) y de la Administración de Seguridad y Salud u OSHA (del inglés, *Occupational Safety and Health Administration*) han hecho que el uso de fluidos de corte, en términos económicos, sea menos rentable (Hubbard *et al.*, 2008). Los fluidos de corte con sustancias cloradas pueden incrementar los costes de eliminación hasta siete veces debido a las exigentes regulaciones medioambientales (Shokrani *et al.*, 2012).
- Los costes de los sistemas de suministro, recirculación y filtración del fluido.

En la Figura 29 se muestra la estructura de costes de lubricación/refrigeración en la fabricación de los árboles de levas para la industria de automoción alemana (Najiha *et al.*, 2016). Se destaca que los costes de depreciación y eliminación de residuos suponen aproximadamente el 59,0%.

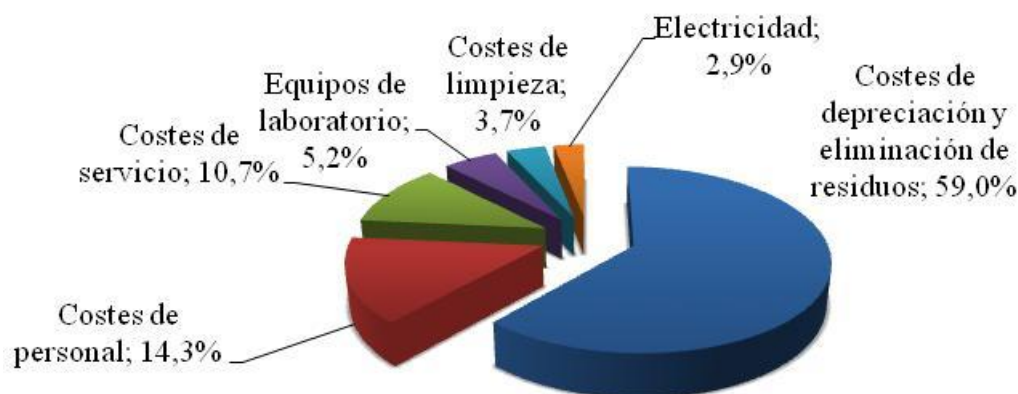


Figura 29 – Estructura de los costes de lubricación/refrigeración para la producción de los árboles de levas de la industria de automoción alemana (Najiha *et al.*, 2016)

Adicionalmente, para la conformidad de las regulaciones ambientales y para la seguridad de los trabajadores hay otros costes relacionados con el mantenimiento de bajos niveles de exposición de los fluidos de corte (Hubbard *et al.*, 2008). En los procesos de mecanizado, el uso de los fluidos de corte genera emisiones de aerosoles y vapor perjudiciales para la salud de los trabajadores. Además, las emisiones de aceite son fácilmente inflamables y en altas concentraciones pueden provocar una explosión. Consecuentemente, para reducir éstos riesgos conviene instalar un sistema de filtración de aire (Madanchi *et al.*, 2015).

La instalación de sistemas de filtración permite la prolongación de la vida de los fluidos de corte, la reducción del coste de disposición de los fluidos, un menor mantenimiento de las máquinas-herramienta, una vida más larga de las herramientas y permite que los fluidos de corte se mantengan más limpios para un mejor ambiente de trabajo y reducción de los riesgos contra la salud (Groover, 2007).

Otra alternativa prometedora es la microfiltración con membrana que es capaz de aumentar la vida de los fluidos de corte eliminando los contaminantes, y reducir el impacto medioambiental y sobre la salud de los trabajadores (Skerlos y Zhao, 2003). Sin embargo, la eficacia de esta tecnología viene limitada por la obturación de los poros el filtro, es decir, el ensuciamiento de la membrana (Wentz *et al.*, 2006).

3.2.1 Consumo de energía

En EEUU, en 2012, el 31% del consumo total de energía está relacionado con la industria, del cual el 90% está relacionado con la industria de fabricación, como se puede observar en la Figura 30 (Zhou *et al.*, 2016). El 75% del consumo de electricidad de los procesos de fabricación es destinado al funcionamiento de las máquinas-herramienta.

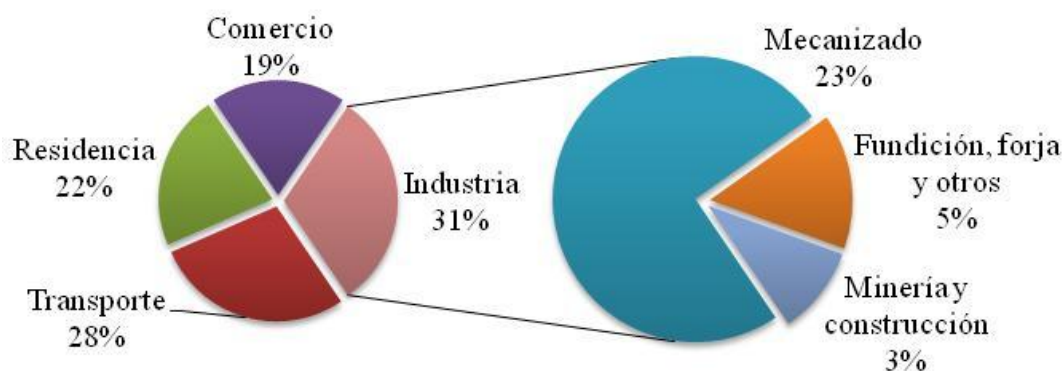


Figura 30 – Consumo de energía de distintos sectores en Estados Unidos (2012)

En los procesos de mecanizado, la reducción del consumo de energía ha sido estudiada siguiendo los siguientes caminos (Park *et al.*, 2009):

- Aplicación de procesos de fabricación que permitan alcanzar las dimensiones geométricas más próximas a la forma final requerida: permite reducir la cantidad de materia a mecanizar, por lo que supone un ahorro de tiempo, energía y potencia eléctrica.
- La minimización de los fluidos de corte: técnicas como el mecanizado en seco o la mínima cantidad de lubricante, minimizan la cantidad de energía necesaria para tratar el residuo. Sin embargo, algunas de éstas tecnologías requieren de excesiva energía para enfriar el propio sistema de lubricación/refrigeración, como el aire frío o los gases criogénicos.
- El desarrollo de máquinas-herramienta multifuncionales: evita los procesos de carga/descarga y transporte de materias entre máquinas.
- Minimizar el tiempo de operación.
- El diseño óptimo del diseño de la fábrica para usar la energía de manera más eficiente.

Estudios anteriores indican que el uso de los fluidos de corte tiene una influencia significativa en el consumo de energía eléctrica, que puede llegar a alcanzar hasta el 50% de la demanda total de energía (Figura 31) (Madanchi *et al.*, 2015). Por lo tanto es muy importante la elección adecuada del sistema de lubricación/refrigeración para mejorar la demanda de energía en el proceso de fabricación.

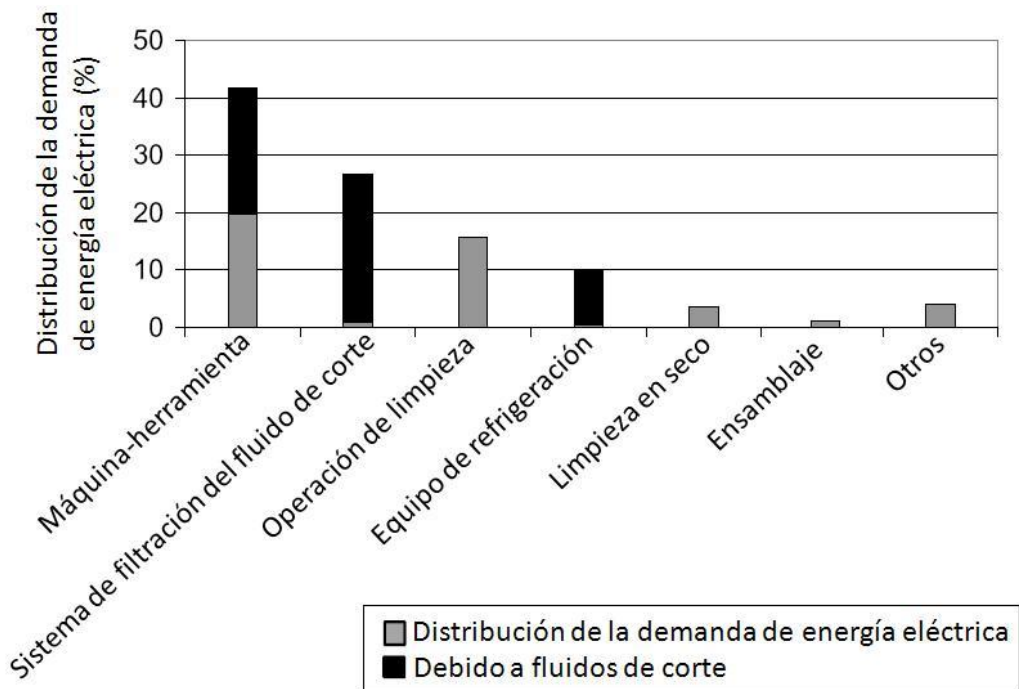


Figura 31 – Demanda de energía en el proceso de mecanizado con fluidos de corte (Madanchi, *et al.*, 2015)

3.2.2 Consumo de agua

Aunque más del 70% de la superficie del planeta tierra es agua, solo un 3% es agua dulce, donde el 1,74% se encuentra en forma de hielo en los glaciares y casquetes polares. Según las estadísticas, en Estados Unidos, la actividad que consume una mayor cantidad de agua dulce es la producción de energía termo-eléctrica (Figura 32) (Zhao *et al.*, 2012). Durante el período de 2005 a 2010 el consumo de agua con fines industriales se ha reducido en un 12% (USGS, 2014).

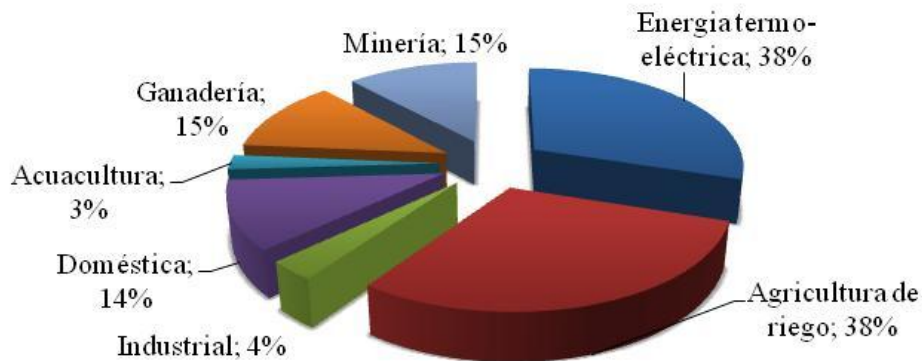


Figura 32 – Extracción de agua dulce por sectores, en Estados Unidos en 2010 (USGS, 2014)

El uso de agua en los procesos de mecanizado puede asociarse, principalmente, al uso de los fluidos de corte, aunque también hay que tener en cuenta el uso de agua para la producción de energía. Aparte del agua utilizada para diluir los concentrados de los fluidos emulsionables en agua, también se debe añadir agua para compensar las pérdidas por evaporación y por arrastre de fluido de las piezas. La cantidad de agua a rellenar puede variar entre el 5 y el 20% del volumen del tanque por día. Finalmente, también se deben considerar el volumen de agua usado durante los procesos de limpieza de las pieza de trabajo y del sistema en sí (Zhao *et al.*, 2012).

3.3 Evaluación de los costes de los lubricantes/refrigerantes alternativos en el mecanizado

Los sistemas de lubricación/refrigeración más usados son los de base aceite y los solubles en agua. El desarrollo de los fluidos de corte tradicionalmente se ha basado en el aceite mineral debido a sus buenas propiedades técnicas y su bajo coste. Sin embargo, es un recurso limitado y tiene un negativo impacto en el medio ambiente (Adekunle *et al.*, 2015). En función de la estrategia de aplicación, se presenta (Tabla 4) una clasificación de los sistemas adicionales que se requieren.

Tabla 4 – Clasificación del grado de necesidad de los requerimientos adicionales de maquinaria y equipos para distintos sistemas de lubricación/refrigeración (Madanchi *et al.*, 2015)

	Inundación	Inundación (aceite multifuncional)	MQL	Seco (con aire comprimido para remover las virutas)	Seco
Sistema de filtración	***	***	**	***	*
Sistemas de extracción de aire	***	***	**	**	**
Limpieza (entre procesos de mecanizado)					
Fluido de limpieza	***	*	*	*	*
Aire comprimido	*	*	***	**	**
Limpieza (entre distintos procesos)					
Fluido de limpieza	***	***	*	*	*
Aire comprimido	*	*	***	**	**
Limpieza (final del proceso)					
Fluido de limpieza	***	***	**	**	**
Aire comprimido	*	*	**	**	**

(*)Bajo; (**) Medio; (***) Alto

El mecanizado en seco supone la eliminación del consumo y de los costes del fluido, así como su posterior tratamiento de residuo. Al no usar fluidos de corte, se reduce la necesidad de limpieza de las piezas de trabajo. Sin embargo, habitualmente existe un mayor desgaste de la herramienta de corte por lo que el coste de mecanizar en seco puede incrementar (Ortuzar y Alberdi, 2012). Esta técnica requiere de estudios específicos de aplicación en proceso y supone un desarrollo de la tecnología de las herramientas y materiales, abriendo nuevas posibilidades de aplicación (IHOBE, 1999).

En los EEUU, un número creciente de empresas están haciendo la transición a los sistemas MQL para reducir costes a la vez que se reduce el impacto medioambiental y los riesgos de salud. Gran parte de la disminución de los costes es debida a la eliminación de la infraestructura requerida por los fluidos de corte, como drenajes, tanques de almacenamiento, bombas y tuberías, y a la disminución de los volúmenes de lubricante a tratar (Skerlos *et al.*, 2008). El consumo de fluido de corte se reduce hasta en un 95% y las virutas obtenidas presentan únicamente una fina capa de fluido lubricante (IHOBE, 1999). Sin embargo, si no se consideran los costos relacionados con la salud y el medio ambiente, muchas empresas consideran que los costes para cambiar la tecnología son demasiado altos (Skerlos *et al.*, 2008).

Los lubricantes y refrigerantes sólidos son difíciles de limpiar y aplicar. En bajas concentraciones y en combinación con la tecnología MQL, se puede aumentar la vida de la herramienta (Tsai y Jian, 2012).

El coste de los equipos en el mecanizado criogénico es una de las consideraciones a tener en cuenta. El almacenamiento del nitrógeno líquido se realiza en tanques especiales de baja presión, entre 1 y 5 bar. Transportar el gas criogénico hasta la zona de corte supone uno de los principales retos de estos sistemas. El coste total de conversión a un sistema de sub-enfriamiento tiene un coste aproximado de unos 10.800 €, mientras que a para los sistemas de alta presión con nitrógeno líquido, el coste de conversión es de unos 2.100 € (Hong y Broomer, 2000).

Hong y Broomer (2000) hacen un análisis económico de los sistemas criogénicos y de los fluidos de corte frente a la aleación AISI 304. El estudio muestra que, contrariamente a la percepción general, el coste del nitrógeno líquido es competitivo frente a los fluidos convencionales habituales, debido a que el caudal es menor, el coste de tratamiento de los fluidos de corte es elevado y que el nitrógeno líquido se usa solamente cuando se está mecanizando (Figura 33).

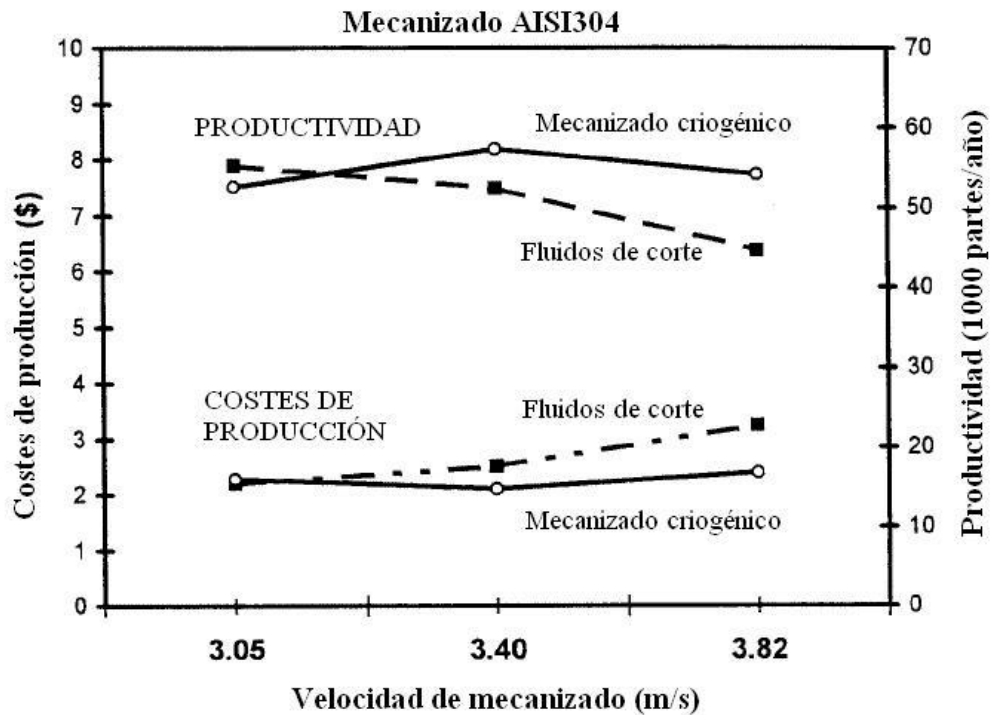


Figura 33 – Comparación del coste de producción y productividad de los sistemas convencionales de refrigeración frente a la refrigeración criogénica (Hong y Broomer, 2000)

Los refrigerantes y lubricantes gaseosos, como en el caso de la lubricación criogénica, el alto coste de estos gases generalmente no los hace rentables para aplicaciones en la producción (Costes, 2007).

El uso de lubricantes sostenibles, como los biolubricantes, supone un coste equivalente a los fluidos de corte convencionales, a pesar de que el coste del fluido de corte es aproximadamente un 50% más caro. Permiten obtener un menor desgaste de la herramienta, pero su vida útil es, generalmente, menor (Lawal *et al.*, 2012).

En la Tabla 5 se muestra una comparación, para los distintos sistemas de lubricación/refrigeración, del consumo y de los costes del material (fluidos de corte, gases, sólidos), de los costes de los equipos necesarios para la aplicación del sistema de lubricación/refrigeración y del coste de las herramientas, teniendo en cuenta el coste en sí y el desgaste.

Tabla 5 – Valoración cualitativa de los costes de los distintos sistemas de lubricación y refrigeración (Boubekri *et al.*, 2010) (Skerlos *et al.*, 2008) (Ortuzar y Alberdi, 2012)

	Coste del material	Consumo de fluido	Coste de los equipos	Coste en herramientas
Fluidos de corte	**	*****	****	***
Mecanizado en seco	*	*	*	*****
MQL	***	**	***	**
Sólidos	****	***	***	***
Criogénicos	***	***	*****	***
Gaseosos	***	***	****	****
Sostenibles	***	*****	*****	**

(*) *Muy bajo*; (**) *Bajo*; (***) *Medio*; (****) *Alto*; (*****) *Muy alto*

CAPÍTULO 4. REVISIÓN MEDIOAMBIENTAL

Los fluidos de corte son usados mundialmente en grandes cantidades. En el año 2010 el consumo en Europa, incluyendo Rusia, fue de unas 610.000 toneladas (Schwarz *et al.*, 2015), lo que supone un riesgo para muchos trabajadores pero también un gran impacto ambiental (Adekunle *et al.*, 2015). La minimización del impacto ambiental de los procesos de fabricación se ha convertido en un asunto importante de investigación, siendo los fluidos de corte una de las causas de contaminación ambiental durante el proceso de mecanizado (Tan *et al.*, 2002).

La selección de los fluidos de corte no puede basarse solamente en sus propiedades primarias (refrigeración, lubricación y evacuación de la viruta) sino que se debe considerar también otras propiedades secundarias como la biodegradabilidad y la estabilidad (Carou *et al.*, 2015). Los fluidos de corte deben cumplir los requerimientos para la protección del medio ambiente, tanto las regulaciones internas como la regulación impuesta por Normas Internacionales como la ISO 14000. Las restricciones de estas legislaciones no solamente conducen a limitaciones y dificultades en los procesos de fabricación y la subida indeseable de los costes asociados, sino que también fuerza a desarrollar y buscar nuevas alternativas tecnológicas.

4.1 Marco legal

Existen varias agencias reguladoras que establecen las directrices, reglas y leyes para el mercado de los lubricantes. La Agencia Europa de sustancias y mezclas químicas o ECHA (del inglés, *European Chemicals Agency*) es responsable de implementar las legislaciones impuestas por el Reglamento de registro, evaluación, autorización y restricción de sustancias químicas o REACH (del inglés, *Registration, Evaluation, Authorization and Restriction of Chemicals*) y el Reglamento sobre Clasificación, etiquetado y embalaje o CLP (del inglés, *Classification, Labeling and Packaging*). Hasta la fecha de su publicación, la gran mayoría de sustancias químicas que se comercializaban no disponían de información suficiente sobre sus propiedades y riesgos (ECHA, 2007).

Por un lado, la Unión Europea ha introducido la legislación REACH con el objetivo de garantizar un alto nivel de protección de la salud humana y el medio ambiente de los riesgos de los productos químicos. El reglamento europeo introduce la obligación de efectuar un registro de todas las sustancias químicas que se comercializan dentro del territorio de la Unión Europea. REACH hace responsable a la industria de evaluar y gestionar los riesgos de los químicos y de proveer la información de seguridad apropiada a sus usuarios (ECHA, 2007).

Por otro lado, la regulación CLP, basada en el Sistema mundialmente armonizado de clasificación y etiquetado de productos químicos o GHS (del inglés, *Globally Harmonized*

System of Classification and Labeling Chemicals) tiene el objetivo de que los productos sean clasificados, etiquetados y envasados correctamente de acuerdo con la toxicidad, y los peligros para la salud y para el medio ambiente. El CLP presenta los peligros de las sustancias y mezclas químicas y la metodología para informar a otras personas sobre los mismos (ECHA, 2007).

Otras administraciones son la Agencia de Protección Ambiental de EEUU o EPA (del inglés, *Environmental Protection Agency*) que se encarga de proteger la salud humana y proteger el medio ambiente y la Agencia Ambiental de Salud y Seguridad o EHS (del inglés, *Environment, Health and Safety*) que limita, por ejemplo, las concentraciones permitidas de los compuestos volátiles orgánicos o VOC (del inglés, *Volatile Organic Compound*) y los biocidas como sustancias que liberan formaldehído (EPA, 2000).

En España, el Real Decreto 374/2001 de 6 de abril (BOE, 2012) sobre la protección de la salud y seguridad de los trabajadores contra los riesgos relacionados con los agentes químicos durante el trabajo, establece los criterios y recomendaciones de protección de la salud de los trabajadores frente a los riesgos derivados de los fluidos de corte. La Ley 8/2010, de 31 de marzo, establece un régimen sancionador previsto en el reglamento del REACH.

La serie de normas ISO 14000 es un conjunto de normas internacionales publicadas para la gestión medioambiental. Permite a las organizaciones gestionar el impacto que sus actividades ejercen sobre el medio ambiente y medir la actuación de acuerdo con unos criterios aceptados internacionalmente. El objetivo es apoyar a la protección medioambiental y la prevención de la contaminación en armonía con las necesidades socioeconómicas. Es una norma voluntaria que puede aplicar cualquier organización que desee mejorar y demostrar su actuación medioambiental mediante un sistema de gestión medioambiental certificado (Analiza Calidad, 2012).

El Reglamento Comunitario de Ecogestión y Ecoauditoría o EMAS (del inglés, *Eco-Management and Audit Scheme*) es una normativa voluntaria de la Unión Europea que reconoce a aquellas organizaciones que han implantado un Sistema de Gestión Medioambiental y han adquirido un compromiso de mejora continua, verificado mediante auditorías independientes. El logotipo EMAS garantiza el cumplimiento, por parte de la organización, de unos estándares de evaluación ambiental y compromiso de mejora continua y de reducción del impacto ambiental a niveles que no superen los de la mejor tecnología disponible y económicamente viable (Heras *et al.*, 2008). La organización debe hacer un análisis medioambiental indicando, entre otros, todos los aspectos medioambientales directos e indirectos que tengan un impacto ambiental significativo, cualificados y cuantificados según convenga: vertidos al agua, residuos peligrosos (Europeo, 2009). EMAS no debe confundirse con las etiquetas ecológicas para productos.

Por otro lado, hay un interés creciente de las organizaciones en alcanzar y demostrar un sólido desempeño de la Seguridad y Salud en el Trabajo (SST) mediante el control de sus riesgos, acorde con su política y objetivos de SST. Lo hacen en un contexto de una legislación cada vez más exigente, del desarrollo de políticas económicas y otras medidas para fomentar las buenas prácticas de SST, y de una mayor preocupación de las partes interesadas en esta materia. OHSAS 18001 especifica los requisitos para un sistema de gestión de la SST, destinados a permitir que una organización controle sus riesgos y mejore su desempeño, permitiendo a las empresas (AENOR, 2010):

- Disminuir la siniestralidad laboral y aumentar la productividad, identificando, evaluando y controlando los riesgos asociados a cada puesto de trabajo, y evitando las causas que originan los accidentes y las enfermedades en el trabajo. La percepción de un entorno más seguro por los trabajadores, conlleva una disminución de las enfermedades, bajas o absentismo laboral, un aumento de la productividad, una reducción progresiva de la siniestralidad y una disminución de sanciones y gastos innecesarios.
- Cumplir la legislación en materia de prevención, integrando ésta última en los procesos de la organización, lo que conlleva una reducción de los costes y sanciones administrativas derivadas de su incumplimiento, además de una mejora de la gestión interna de la organización y de la comunicación entre empresa-trabajador, y empresa-administraciones y partes interesadas.
- Fomentar una cultura preventiva mediante la integración de la prevención en el sistema general de la empresa y el compromiso de todos los trabajadores con la mejora continua.

4.2 Problemas medioambientales asociados al empleo de lubricantes y refrigerantes convencionales

La cantidad de lubricante que se emplea en la industria sigue siendo muy elevada. Al final de su vida útil, este tipo de fluidos es considerado como peligroso y, por tanto, poco sostenible con el medio ambiente. En muchos casos, los procesos de fabricación actuales no son suficientemente limpios y producen sustancias que contaminan el aire, el agua y el suelo (Sokovic y Mijanovic, 2001).

Si se analiza el proceso de mecanizado, se diferencian varios inputs como las herramientas, los materiales de proceso, la energía y otros agentes. Por un lado, después del proceso se obtiene como resultado un producto que muestra las características requerida en términos de calidad, eficiencia económica y, cada vez más, reciclabilidad. Por otro lado, se producen residuos materiales indeseados y emisiones, que dependerán del tipo de proceso (Figura 34). El comportamiento ecológico de las empresas también está influenciado por factores externos como la legislación y la conciencia medioambiental social (Sokovic y Mijanovic, 2001).

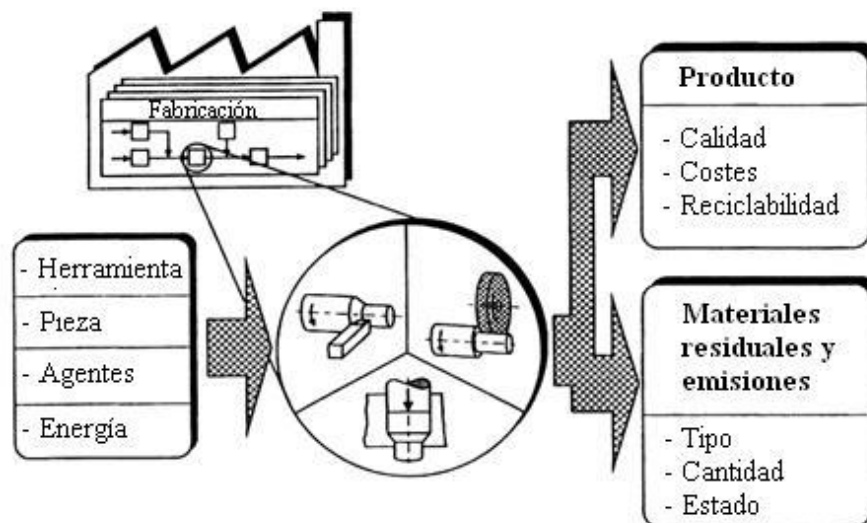


Figura 34 – Balance del proceso de fabricación (Sokovic y Mijanovic, 2001)

En el proceso de mecanizado se pueden diferenciar cuatro grandes problemas medioambientales relacionados con los fluidos de corte: los residuos de fluido de corte agotado, el arrastre de fluidos en piezas y virutas, los aerosoles y la utilización de sustancias peligrosas (IHOBE, 1999).

4.2.1 Residuo de fluido de corte agotado

El fluido de corte se considera agotado cuando se degrada de tal manera que no puede cumplir con las funciones requeridas. Los fluidos son recirculados; de modo que a lo largo de su uso sufren cambios químicos, físicos y biológicos que afectan a su composición (Byers, 2006).

Los residuos de fluido de corte agotado dependen de la naturaleza físico-química del producto, que condicionará la duración del fluido así como la generación y el tipo de tratamiento de los residuos. El deterioro de los fluidos de corte de base acuosa es el resultado de varias causas:

- La incompatibilidad del aceite y agua, por acumulación de aceites, fluidos hidráulicos y otros lubricantes externos al fluido de corte.
- Acumulación de partículas de metal y virutas, de suciedad y escombros.
- La susceptibilidad de las emulsiones del crecimiento microbiano.
- La evaporación del agua y agotamiento de sus aditivos y compuestos.

- La capacidad de los iones del agua dura a desestabilizar las emulsiones y perder la capacidad de lubricación y refrigeración (Geeley y Rajagopalan, 2004).
- La susceptibilidad de los tensioactivos a generar espuma cuando son agitados mecánicamente.

Algunos de los problemas relacionados con el mal estado de los fluidos son (OSHA, 2001) la corrosión u oxidación de la herramienta o de las piezas de trabajo, fallo de la herramienta debido a la pérdida de funcionalidad, olor a rancio debido al crecimiento microbiano y el cambio de las propiedades del fluido como, por ejemplo, el pH.

Los fluidos de corte se deterioran y, periódicamente, deben ser reemplazados. Este período puede variar de semanas a meses en función de los requerimientos del proceso y del mantenimiento del fluido de corte. Se puede alargar su vida útil aumentando la resistencia al crecimiento de los microorganismos y la resistencia a fluctuaciones de la concentración de los componentes activos en el fluido de corte que son consumidos durante el proceso. Además, se debe tener en cuenta la robustez del fluido de corte ante contaminantes como el goteo de aceite, la acumulación de iones y las partículas metálicas generadas de las piezas mecanizadas (Skerlos *et al.*, 2008).

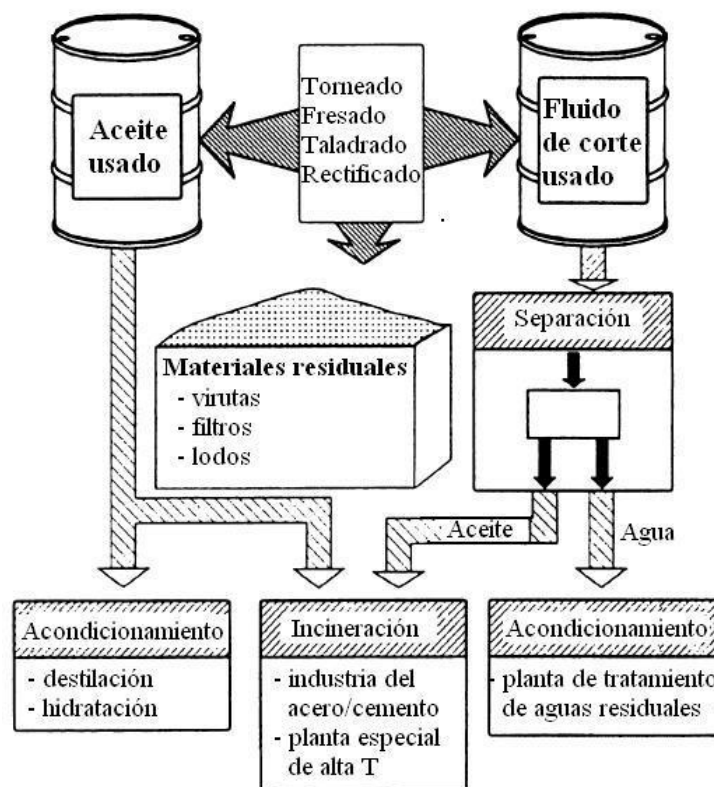


Figura 35 – Residuos de los fluidos de corte en la tecnología de mecanizado (Sokovic y Mijanovic, 2001)

La sustitución de los fluidos de corte implica un elevado volumen de residuos a tratar. Con el objetivo de reciclar el agua, primeramente se separa el agua del aceite. A continuación, el agua se destina a un tratamiento de fluidos residuales y el aceite se puede destinar a la valorización energética (Figura 35) (Sokovic y Mijanovic, 2001).

4.2.2 Arrastre en piezas y virutas

Las piezas de trabajo mecanizadas y las virutas originadas durante el proceso de mecanizado arrastran parte del fluido de corte. Las piezas resultantes deben limpiarse para eliminar los restos de fluidos y es necesario realizar un tratamiento de limpieza de las virutas, antes de poder gestionarlas como un residuo sólido (Skerlos *et al.*, 2008).

El arrastre de los fluidos de corte origina un elevado consumo de fluido de corte y una reducción de la eficiencia del baño de limpieza posterior debido a una excesiva acumulación de fluido en las piezas (IHOBE, 1999).

4.2.3 Utilización de sustancias peligrosas

Los fluidos de corte están formulados con sustancias químicas que mejoran sus propiedades, los aditivos. La variedad de sustancias químicas en el mercado es muy amplia, algunas de ellas suponen algún riesgo para el medio ambiente o la salud humana.

La información proporcionada por el fabricante de los fluidos de corte, como las fichas de seguridad o las especificaciones del producto, suelen ser de poca ayuda para los usuarios, y deben hacer esfuerzos para poder cumplir con la legislación (Sokovic y Mijanovic, 2001). Es obligatoria la declaración de todo componente peligroso cuando se encuentre en concentraciones superiores al 1%, a excepción de los componentes considerados internacionalmente como cancerígenos, mutagénicos o teratogénicos; de acuerdo con lo establecido por varias organizaciones e instituciones², los que deberán declarar cuando estén presentes en concentraciones mayores al 0,1%. Sin embargo, la mayoría de las fichas de seguridad no aportan información de valor sobre el tipo y cantidades de aditivos usados en las formulaciones, frecuentemente por confidencialidad de la empresa o porque hay una patente potencial (Massawe y Geiser, 2012).

²Instituciones y organizaciones que establecen los componentes químicos considerados internacionalmente como cancerígenos, mutagénicos o teratogénicos: ACGIH (*American Conference of Governmental Industrial Hygienists*), ATSDR (*Agency for Toxic Substances and Disease Registry*), EPA, IARC (*International Agency for Research on Cancer*), NIOSH (*National Institute for Occupational Safety and Health*), OSHA, TSCA (*Toxic Substances Control Act*)

La seguridad de los fluidos de corte se caracteriza por los siguientes criterios que se pueden encontrar en las fichas de seguridad: estabilidad y reactividad, información toxicológica, información ecológica y consideraciones sobre eliminación (ECHA, 2007). Hay unidades que permiten cuantificarlos como la LD50 (dosis letal mediana), LC50 (concentración letal mediana) o el punto de inflamabilidad (Schwarz *et al.*, 2015).

Entre las sustancias usadas en los fluidos de corte que representan una mayor problemática son: aminas secundarias, nitrito sódico, fenoles, parafinas cloradas, derivados borados, hidrocarburos aromáticos policíclicos o PAHs (del inglés, *Polycyclic Aromatic Hydrocarbons*) y los biocidas (IHOBE, 1999).

Uno de los mayores problemas de los fluidos de corte que recientemente ha sido disminuido es la cantidad de nitrosaminas; producidas por la reacción de nitrito con aminas secundarias (como la dietanolamina) de los fluidos de corte y que son carcinógenas. Por un lado, el nitrito sódico es un compuesto usado como agente inhibidor de la corrosión, altamente tóxico para el medio ambiente acuático y dañino para la salud de los trabajadores (ISTAS, 2001). Por otro lado, las aminas secundarias son usadas para la neutralización de los ácidos contenidos en los fluidos de corte y, además, proveen protección contra la corrosión. Actualmente, estas aminas son sustituidas por otras aminas primarias y terciarias, como la monoetanolamina y la trietanolamina, respectivamente (Simpson *et al.*, 2003).

Los alquifenoles y el ácido cresílico son sustancias usadas como emulgentes en fluidos acuosos. Estos compuestos están en período de sustitución o eliminación debido a su elevada toxicidad (IHOBE, 1999).

Los aditivos que contienen clorados, como las parafinas cloradas que habían sido usadas como aditivos de extrema presión, son una amenaza para la salud humana y para el medio ambiente. Además, los aditivos clorados no son adecuados para el mecanizado de titanio porque pueden provocar corrosión en la superficie del mecanizado (Shokrani *et al.*, 2012). El tratamiento del residuo de fluidos de corte con contenido de clorados es difícil por lo que se clasifica como residuo peligroso (Sokovic y Mijanovic, 2001).

Los compuestos borados, como el ácido bórico, son sustancias que proveen múltiples funciones al fluido de corte entre las que cabe destacar su poder inhibidor de la corrosión, la capacidad de regulación de pH y su efecto bacteriostático (Lawal *et al.*, 2012). Sin embargo, el ácido bórico está clasificado como tóxico para la reproducción y está incluido como candidato en la lista de sustancias de alta preocupación de la ECHA (ECHA, 2007).

Otros compuestos que se han prohibido o que han sido limitados por su peligrosidad para la salud de los trabajadores son los PAHs. Los PAHs están presentes en los aceites ligeramente

refinados y como producto de la degradación térmica a muy altas temperaturas. Estos compuestos son carcinógenos, mutágenos y teratógenos. El riesgo a su exposición ha decrecido y el ratio de formación en el mecanizado es muy bajo (Simpson *et al.*, 2003).

En los fluidos de corte se han encontrado bacterias y hongos entre los que las *Pseudomonas* y las *Conomonas testosteroni* son las más comunes. En la Tabla 6 se incluyen los principales tipos de microorganismo encontrados (Trafny *et al.*, 2015). Estos microorganismos se alimentan de los aceites de refrigeración, de los inhibidores de corrosión y de los emulsionantes así como de otros contaminantes del sistema. El crecimiento incontrolado de microorganismos puede provocar la pérdida de las características funcionales del fluido (Sokovic y Mijanovic, 2001).

Tabla 6 – Microorganismos hallados frecuentemente en los fluidos de corte (Schwarz *et al.*, 2015)

Nombre del microorganismo	Tipo
<i>Mycobacterium</i> sp	Bacteria aerobia grampositiva
<i>Shewanellaputrefaciens</i>	Bacteria gramnegativa
<i>Pseudomonasputida</i>	Bacteria gramnegativa
<i>Pseudomonasstutzeri</i>	Bacteria gramnegativa
<i>Pseudomonas mendocina</i>	Bacteria gramnegativa
<i>Conamonastestosteroni</i>	Bacteria gramnegativa
<i>Stenotrophomonasmaltophilia</i>	Bacteria aerobia gramnegativa
<i>Morganellamoganii</i>	Bacteria gramnegativa
<i>Citrobacterfreundii</i>	Bacteria aerobia gramnegativa
<i>Acinetobactersp</i>	Bacteria aerobia gramnegativa
<i>Orchrobactrum</i> sp	Bacteria gramnegativa
<i>Brevundimonas diminuta</i>	Bacteria gramnegativa
<i>Bacillus</i> sp	Bacteria anaerobia grampositiva
<i>Fusarium</i> sp	Hongo
<i>Acremonium</i> sp	Hongo
<i>Exophialasp</i>	Hongo
<i>Trichodermasp</i>	Hongo
<i>Penicillium</i> sp	Hongo

Cuando la contaminación microbiana de los fluidos de corte no está adecuadamente controlada se forman biopelículas y la biomasa se hace visible (Trafny *et al.*, 2015). Los cambios funcionales que pueden experimentar los fluidos de corte en presencia de microorganismos son (Brutto, 2016):

- Características de la emulsión: puede modificar sus propiedades por la producción de biosurfactantes o romper la emulsión por la producción de ácidos orgánicos. Además, los biosurfactantes aumentan la capacidad espumante y las tendencias a formar aerosoles.
- Características de lubricidad y de extrema presión: degradación parcial de los aditivos que proporcionan éstas propiedades como, por ejemplo, los fosfatos, los ésteres fosfatados o los sulfonatos.
- Inhibición de la corrosión: las aminas proporcionan protección contra la corrosión, sin embargo son una fuente de alimento para los microorganismos. La disminución de estos compuestos químicos junto con la capacidad de los microbios, por efectos tales como celdas de aireación diferencial, la producción de especies corrosivas contribuyen a aumentar la corrosión (Beech *et al.*, 2000).
- Aspecto y olor: los fangos y los olores inusuales pueden ser uno de los primeros indicadores de una actividad microbiana significativa.

Los efectos económicos adversos del crecimiento incontrolado de microorganismos en los fluidos se debe a los costes asociados a (Byers, 2006):

- La eliminación y sustitución del fluido agotado, al que hay que sumar los costes de tratamiento de residuo. Los microorganismos acortan la vida del fluido de corte.
- Las tareas de limpieza del sistema.
- Una menor productividad y un aumento del número de piezas rechazadas.
- Una disminución de la vida de la herramienta.
- Efectos económicos de problemas asociados a la salud de los trabajadores.

Para evitar que la pérdida de funcionalidad de los fluidos de corte se usen biocidas. Los biocidas pueden ser usados para controlar la actividad microbiana y bacteriana y así aumentar la vida útil del fluido. Algunos de los biocidas más usados son la triazina, la oxazolina, la dicitclohexilamina o el fenoxietanol. Sin embargo son unos aditivos muy costosos y extremadamente peligrosos (Hong y Broomer, 2000).

Mantener la concentración óptima de biocidas en el fluido de corte puede ser complicado debido a la evaporación del agua del fluido. Cuando se rellena con agua dulce no suelen hacerse las pruebas adecuadas para comprobar la concentración de biocida. Por un lado, una alta concentración de biocidas puede afectar la salud de los trabajadores y causar dermatitis por el contacto con los fluidos de corte. Por otro lado, una concentración insuficiente de biocidas no inhibe el crecimiento de bacterias e incluso puede llegar a promover la formación de biopelículas (Brutto, 2016).

Cuando hay un crecimiento de microorganismos y de la biopelícula, aun habiendo biocidas en el fluido de corte, solamente una limpieza minuciosa y un proceso de desinfección antes del rellenado del sistema son eficaces para inhibir el recrecimiento de las biopelículas (Trafny *et al.*, 2015).

Muchos de los biocidas usados en la industria de los lubricantes, como el HTHT (hexahidro-1,3,5-tris(2-hidroxietil)-triazina) liberan formaldehído (Latorre *et al.*, 2011). El formaldehído es un compuesto químico altamente volátil y muy inflamable que ha sido clasificado por la Agencia Internacional para la Investigación del Cáncer o IARC (del inglés, *International Agency for Research on Cancer*) en el grupo I, Carcinógeno confirmado para humanos (IARC, 2006).

El uso de biocidas está literalmente prohibido en algunas fábricas, sin importar si están legalmente certificados o que exista la necesidad microbiológica demostrada. No hay un consenso del nivel de bactericida o fungicida necesario, cada fabricante de lubricantes puede hacer una recomendación al usuario a partir de su experiencia para determinar el mejor nivel profiláctico (Sokovic y Mijanovic, 2001). La pasteurización y la irradiación ultravioleta han sido propuestos como alternativas al uso de biocidas, sin embargo, su uso no es extendido, debido a razones económicas (Schwarz *et al.*, 2015).

4.2.4 Aerosoles y otras emisiones ambientales

Los aerosoles son una de las problemáticas ambientales con mayor impacto en la salud laboral (IHOBE, 1999). El tamaño de partícula típico de un aerosol es de 0,1 a 10 μm , con un 75% de partículas (concentración másica) de tamaño suficiente para ser inhaladas por el cuerpo humano. Los mecanismos principales a través de los cuales el fluido de corte se convierte en aerosoles líquidos en el ambiente son (Figura 36) (Schwarz *et al.*, 2015):

- Evaporación debido a las altas temperaturas de corte. Los compuestos más volátiles se vaporizan y después se condensan formando partículas pequeñas de un tamaño menor a 1 μm , de distinta composición del fluido y que tienden a migrar por todo el ambiente.
- La atomización ocurre por el movimiento mecánico debido al impacto del fluido contra la rotación de la herramienta o la pieza, formando partículas de un tamaño de 1 a 10 μm , de la misma composición que el fluido de corte y que no migran lejos de su origen.
- Salpicaduras provocadas por el impacto del fluido bajo presión contra la herramienta, la pieza o la máquina.
- La aireación de los fluidos, ya sea por su tendencia a formar espuma o debido a una excesiva agitación, también forma aerosoles.

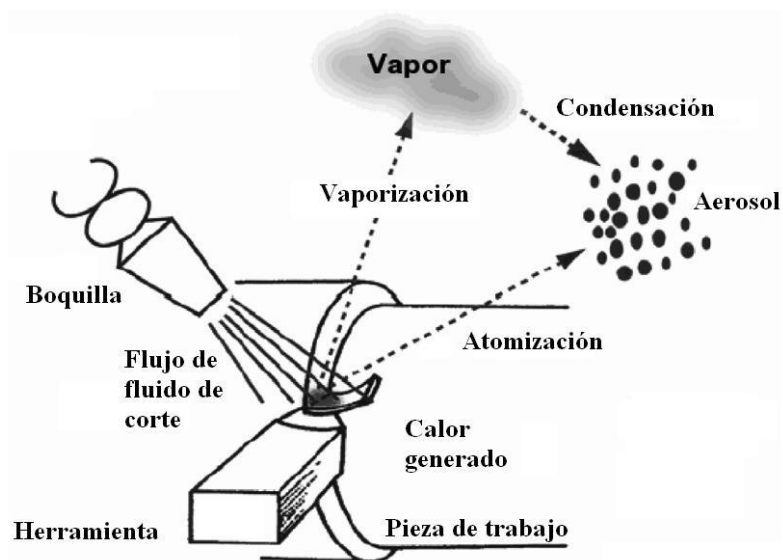


Figura 36 – Mecanismos de vaporización y atomización en la formación de aerosoles (Adler *et al.*, 2006)

El riesgo de inhalación de los aerosoles es debido a la exposición de tres agentes: fluido del proceso, contaminantes microbiales y otros contaminantes químicos acumulados en los fluidos de corte durante el proceso como, por ejemplo, elementos tóxicos (aceites minerales, alcanolaminas, nitrosaminas, VOC) o alérgenos del metal de trabajo (como el Cr, Pb, Ni, Cd) (Siniawski y Bowman, 2009). Desde el punto de vista del riesgo para la salud de los trabajadores, deben considerarse los siguientes parámetros (Schwarz *et al.*, 2015):

- La composición química del aerosol.
- El tiempo y el método de exposición.
- La concentración y el tamaño del aerosol.

Los aerosoles pueden provocar graves problemas en la salud del trabajador: dolor de ojos, de nariz y garganta, irritación del aparato respiratorio, disfunción pulmonar, bronquitis y asma, y también en circunstancias poco frecuentes neumonitis, neumonía lipoidea y fibrosis (Simpson *et al.*, 2003). En los últimos años, el SWORD (del inglés, *Survey of Work-related and Occupational Respiratory Disease*) y la OPRA (del inglés, *Occupational Physicians' Reporting Activity*) reportaron una estimación anual de 11 nuevos casos de asma relacionados con la exposición de fluidos de corte en el entorno de trabajo. Las posibles causas del asma pueden ser algunos productos de algunos fluidos, como el aceite de pino, la etanolamina y ésteres de metilo de ácidos grasos (Simpson *et al.*, 2003).

El Instituto Nacional para la Seguridad y la Salud Ocupacional o NIOSH (del inglés, *National Institute for Occupational Safety and Health*) es una agencia federal de los Estados Unidos encargada de realizar investigaciones y recomendaciones para la prevención de enfermedades y

lesiones relacionadas con el trabajo. Su recomendación para reducir el riesgo de los efectos contra la salud de los trabajadores es que la exposición a los aerosoles de los fluidos de corte esté limitada a $0,4 \text{ mg/m}^3$ de aire o $0,5 \text{ mg/m}^3$ de aire (masa total de las partículas) como concentración por promedio ponderado en un tiempo de hasta 10 horas de una jornada de trabajo durante una semana laboral de 40 horas (NIOSH, 2013).

Por otro lado, en el método ID-128 de la OSHA se definen los límites permisibles de exposición a 5 mg/m^3 como concentración por promedio ponderado de 8 horas de exposición a los aerosoles de aceites minerales, expresado en masa total de partículas (Najiha *et al.*, 2016) (OSHA, 2001). Para los fluidos de corte solubles en agua, OSHA no hace ninguna estimación de los límites de exposición, pero la Comisión de Salud y Seguridad o HSE (del inglés, *Health and Safety Executive*) sí que recomienda en el método MDHS 95/2 un valor límite de 1 mg/m^3 (Schwarz *et al.*, 2015).

Varios estudios realizados han encontrado diferentes exposiciones para diferentes tipos de industria, en especial según el tipo de operación. Por ejemplo, para el rectificado se ha observado una exposición media de $1,75 \text{ mg/m}^3$ comparado con los $0,95 \text{ mg/m}^3$ en otras operaciones. En función del tipo de fluido de corte, para aceites minerales puros es de $1,49 \text{ mg/m}^3$, para aceites solubles $1,08 \text{ mg/m}^3$, para fluidos sintéticos $0,52 \text{ mg/m}^3$ y para los semi-sintéticos $0,50 \text{ mg/m}^3$. En el proceso de torneado con fluidos sintéticos, se ha observado que la atmósfera depende de la distancia del muestreo con el punto de formación del aerosol, de la velocidad del husillo y del flujo másico de fluido de corte (Schwarz *et al.*, 2015).

4.3 Prevención, minimización y valorización

Para poder cumplir con las funciones fundamentales que desempeñan estos fluidos y cumplir, a la vez, con una sociedad que se preocupa cada vez más por el medio ambiente, se siguen las estrategias de prevención, minimización y valorización (Terradillos y Ciria, 2014). La prevención y minimización son la aplicación de medidas que evitan o reducen la generación de residuos, sustancias peligrosas o contaminantes presentes en ellos. La valorización incluye acciones de reutilización, regeneración o incineración con recuperación de energía para limitar el impacto ambiental (Generalitat Valenciana, 2002).

El Informe Brundtland fue presentado en 1987 por la Comisión Mundial para el Medio Ambiente y el Desarrollo de la ONU, enfrenta y contrasta la postura de desarrollo económico actual con un modelo de producción sostenible basado en (Merenson, 2001): procesos de producción más eficientes (en términos de uso de energía y recursos), estrategias preventivas, tecnologías de producción limpias y procedimientos a lo largo del ciclo de vida del producto y la minimización o supresión de los desperdicios.

4.3.1 Prevención

El objetivo de la prevención es seleccionar de entre todas las alternativas disponibles aquella que minimice el impacto ambiental. Por lo tanto, para cada proceso de mecanizado se debe analizar la factibilidad de reemplazar los fluidos de corte convencionales por otros sistemas de lubricación/refrigeración.

El mecanizado en seco supone la eliminación completa del fluido de corte y, consecuentemente, se disminuye el impacto ambiental y los riesgos en la salud de los trabajadores. Tampoco existen residuos de fluido en las piezas ni en las virutas, con lo que hay una reducción de costes y energía en el proceso de limpieza (Ortuzar y Alberdi, 2012).

En los sistemas MQL hay una drástica disminución del uso de fluidos de corte (Boubekri y Shaikh, 2013). Las cantidades usadas son tan bajas que el fluido de corte es consumido casi completamente en el proceso, eliminando los problemas de tratamiento de los fluidos de corte. Además, en las virutas producidas durante el mecanizado, casi no hay restos de fluidos, con lo que son fácilmente reciclables (Jayal *et al.*, 2007). Sin embargo, se debe considerar que existe un consumo de energía elevado para la aplicación del MQL y que un exceso de producto puede producir aerosoles, aunque a nivel menor que los fluidos de corte convencionales (Skerlos *et al.*, 2008).

La lubricación/refrigeración criogénica con nitrógeno líquido (LN₂) es un sistema que no deja ningún residuo dañino al medio ambiente. El nitrógeno líquido absorbe el calor generado durante el proceso de mecanizado y se evapora rápidamente pasando a formar parte del aire (Irani, 2005). En la lubricación/refrigeración criogénica con dióxido de carbono (CO₂), el fluido también se evapora. Aunque la cantidad de CO₂ evaporada es baja, sigue siendo un gas de efecto invernadero.

En las piezas de trabajo y las virutas resultantes del mecanizado con el uso de lubricantes/refrigerantes gaseosos criogénicos no se observan residuos de fluido de corte, por lo que se reducen los costes de un tratamiento posterior. Asimismo, las sustancias utilizadas no son peligrosas ni se forman aerosoles (Costes, 2007).

Otra alternativa es el uso de fluidos de corte sostenibles. Por un lado, eliminar aquellos aditivos considerados sustancias peligrosas, como pueden ser el nitrito sódico o los biocidas. Por otro lado, se puede sustituir la base de aceite mineral por aceite de origen vegetal o sintético, como el aceite de colza y el aceite de palma. Estos aceites son ecológicos, renovables, menos tóxicos y más fácilmente biodegradables que los fluidos convencionales (Lawal *et al.*, 2012).

La biodegradabilidad es la medida más importante para determinar la compatibilidad medioambiental. Los aceites vegetales, también usados en aplicaciones MQL, son altamente biodegradables y los ésteres sintéticos poseen un amplio rango de biodegradabilidad (Weinert *et al.*, 2004). Actualmente, hay cinco grandes grupos de productos biodegradables aplicados en los fluidos de corte (Nagendramma y Kaul, 2012):

- Aceites vegetales alto oleico, principalmente los triglicéridos.
- Polialfaolefinas de baja viscosidad.
- Polialquilenglicoles.
- Ésteres de ácidos dibásicos.
- Polioli ésteres.

No obstante, hay que tener en cuenta que los fluidos de corte biodegradables no tienen porqué ser ecológicos. Muchos de ellos contienen aditivos como biocidas, que pueden ser potencialmente tóxicos y peligrosos para el medio ambiente y para la salud (Massawe y Geiser, 2012). Por lo tanto, para que sea un fluido de corte sostenible, hay que tener en cuenta ambas consideraciones: la biodegradabilidad y la eliminación de sustancias peligrosas.

La Tabla 7 presenta una valoración cualitativa del impacto medioambiental de distintos sistemas de lubricación/refrigeración usados en el proceso de mecanizado, teniendo en cuenta las anteriores consideraciones.

Tabla 7 – Valoración cualitativa del impacto medioambiental de los distintos sistemas de lubricación/refrigeración

	Residuo	Arrastre en piezas y virutas	Contenido de sustancias peligrosas	Aerosoles y emisiones ambientales	Riesgo trabajadores
Fluidos de corte	*****	*****	****	*****	*****
Mecanizado en seco	*	*	*	*	*
MQL	**	**	**	***	***
Criogénicos	*	*	*	** ⁽¹⁾	*
Gaseosos	*	*	*	*	*
Sostenibles	****	*****	***	****	***

(*)Muy bajo; (**) Bajo; (***) Medio; (****) Alto; (*****) Muy alto

⁽¹⁾En el caso del nitrógeno líquido, muy bajo.

4.3.2 Minimización

El objetivo de la minimización es reducir al máximo el consumo de fluidos de corte. La gestión y mantenimiento de los fluidos de corte puede ser mejorada haciendo medidas de control a corto tiempo sobre el fluido (Sokovic y Mijanovic, 2001), reducir la concentración o dosis y reducir la exposición (duración, repetición y frecuencia). Las acciones que la organización debe tomar son (Schwarz *et al.*, 2015):

- Acciones técnicas: incluye reducir la cantidad de fluido de corte, cambiando del proceso tecnológico o usando el fluido de manera más efectiva. Cuando se selecciona el tipo de fluido de corte se deben considerar los siguientes aspectos:
 - o La toxicidad de los componentes: no debe ser irritante ni sensibilizante. Se deben evitar productos como aceites que contengan PAH, parafinas cloradas, aminos secundarios, nitritos y biocidas que liberen formaldehído.
 - o La inflamabilidad de los aceites puros.
 - o La gestión del fluido agotado.
- Acción de organización: incluye acciones como reducir el número de trabajadores y su rotación en el lugar de peligro de exposición, corregir los espacios afectados (las áreas de descanso fuera de zonas de peligro) y monitorizar la concentración de contaminantes en el ambiente de trabajo.
- El uso de equipos de protección individual debe aplicarse en segundo lugar, cuando no es posible evitar la exposición.

4.3.3 Valorización

La valorización de los fluidos de corte en el proceso de mecanizado es el último recurso para reducir el impacto medioambiental. Considera los residuos como materia prima alternativa. Los principales motivos que inducen a una valorización de los residuos son (IHOBE, 1999):

- Regulaciones más estrictas.
- Aumento del coste y tratamiento de la gestión de los fluidos agotados.
- Creciente sensibilización ambiental de la población.
- Mejora técnica de los procesos de fabricación que incluye el concepto de producción limpia.

Para la valorización de los fluidos de corte agotados, se aplica un tratamiento para la rotura de las emulsiones. Primero se separan los aceites no emulsionados y partículas finas del resto del

fluido. Las partículas finas metálicas se extraen para su posterior valorización. A continuación, se aplica una de las tecnologías aplicadas en la destrucción de taladrinas de la Tabla 8 para poder extraer una fracción de lodos de aceite. Estos lodos pueden destinarse a la valorización energética, siempre y cuando no contengan cloro ni metales pesados. Posteriormente, se realiza un tratamiento biológico y un tratamiento físico-químico para eliminar la materia orgánica y precipitar los metales disueltos (Ambientum, 2014) (Cheng *et al.*, 2005).

Tabla 8 – Tecnologías aplicadas en la destrucción de fluidos de corte (Ambientum, 2014) (Cheng *et al.*, 2005)

Tecnología	Observaciones
Electrofloculación	Aplicación de corrientes eléctricas
Ultrafiltración	Separación por membranas
Evaporación	Elevadas inversiones y consumos energéticos
Rotura ácida de emulsiones con floculación posterior de sales de hierro	Tratamiento químico. Genera grandes cantidades de fangos
Rotura neutra de emulsiones con floculantes orgánicos	Tratamiento químico
Ósmosis inversa	Separación por membranas

4.4 Otras consideraciones

El Instituto Nacional para la Seguridad y la Salud Ocupacional (NIOSH) estima que, en Estados Unidos, más de 1,2 millones de trabajadores están expuestos a las taladrinas y más de 6 millones están expuestos a aceites minerales (Byers, 2006). En cuanto a España, se estima que nada más en el sector metalúrgico, el número de personas implicadas en la manipulación de estos productos alcanzaría la cifra de 90.000, pudiendo aproximarse a las 300.000 si se considera la totalidad del tejido productivo (Universitat Politècnica de València, 2012).

En los últimos años los fluidos de corte se han convertido en uno de los focos de atención de la Administración de Seguridad y Salud Ocupacional (OSHA) de Estados Unidos. Los problemas de salud más típicos de los trabajadores expuestos a los fluidos de corte son resultado de (Schwarz *et al.*, 2015):

- La inhalación de los aerosoles de estos fluidos; lo que puede provocar irritación de garganta (dolor, ardores), de nariz (tos, congestión, hemorragia nasal) así como asociarse a otras enfermedades respiratorias tales como el asma, bronquitis crónica, alveolitis alérgica.
- El contacto cutáneo con los fluidos de corte; lo que puede producir alergias o dermatitis. Sus síntomas variarán en función de la composición del fluido, de la presencia de ingredientes,

del tipo de contaminantes del fluido de corte, la composición del material de trabajo y la predisposición individual a alergias. Además, los productos del petróleo pueden causar la formación de acné.

- La ingestión accidental de los fluidos (menor exposición); lo que puede provocar efectos nocivos en la nariz, faringe y esófago y trastornos en el aparato digestivo (Byers, 2006).

Los daños fisiológicos debido a la exposición química pueden ser agudos (tras un tiempo de exposición corto) o crónicos (exposición prolongada) en función de varios factores (Byers, 2006):

- Ruta de exposición.
- Duración de la exposición.
- Tipo de compuesto químico o contaminante.
- Concentración del compuesto químico o contaminante.
- Susceptibilidad del trabajador al compuesto químico o contaminante.
- Interacción de los compuestos químicos o contaminantes en una exposición variada.

Además, en los últimos años varios estudios han encontrado una relación causal entre trabajar con fluidos de corte y varios tipos de cáncer: de laringe, esófago y leucemia (Zeka *et al.*, 2004), páncreas, estomago, recto, vejiga, escroto y piel (Schwarz *et al.*, 2015).

Los problemas de piel incluyen: heridas, foliculitis, elaiocniosis (acné por hidrocarburos), infecciones y dermatitis irritante y alérgica.

- Lesiones físicas de la piel: cortes y abrasiones.
- Foliculitis y elaiocniosis: la exposición directa de aceites minerales puede provocar foliculitis, la inflamación de uno o más folículos pilosos. Este problema se presenta habitualmente en el cuello, manos, brazos y muslos. El contacto con aditivos clorados, como ciertos hidrocarburos aromáticos halogenados, puede provocar cloracné (Sokovic y Mijanovic, 2001) y, además, si el trabajador tiene acné cuando empieza a trabajar con los fluidos de corte puede agravarse la enfermedad (Washington State Department of Labor and Industries, 2001).
- Dermatitis irritante: es el problema más común por contacto cutáneo. El pH de los fluidos de corte está alrededor de 9 (bastante alcalino) y contiene un gran número de aditivos y solventes. Estos fluidos desplazan la capa protectora de la piel y dañan la capa externa de la piel, causando sequedad o formación de grietas en la piel, especialmente en la palma de las manos.

- Dermatitis alérgica: es menos común que la dermatitis irritante y, aunque es difícil diferenciarla, en la dermatitis alérgica se activa la respuesta a dosis muy bajas del agente químico concreto, como los biocidas, los inhibidores de corrosión, las aminas o impurezas de metal, cuando el cuerpo ya se ha sensibilizado. Puede aparecer en partes del cuerpo que no han estado en contacto directo con el producto químico. El producto provoca una reacción, toda la piel se sensibiliza y puede aparecer una erupción en cualquier parte del cuerpo. Los trabajadores que ya están sensibilizados a un agente químico específico probablemente padecerán una reacción alérgica inmediata a la siguiente exposición (INSHT, 2012).

Los fluidos de corte en base agua causan muchos más casos de dermatitis que los aceites que los aceites minerales puros. Los fluidos de corte pueden debilitar las defensas naturales de la piel y sus aditivos pueden provocar irritación de la piel. El contacto con el aceite, los emulsionantes y los dispersantes puede desengrasar la piel, así como los fluidos acuosos. El contacto con la pieza de trabajo, la herramienta o las virutas puede provocar micro-heridas en la piel, que además pueden llegar a infectarse al estar en contacto con los fluidos de corte contaminados con microorganismos (Hong y Broomer, 2000).

El pH alcalino destruye la capa ácida protectora de la piel, por lo que la piel se vuelve más vulnerable a las infecciones de microorganismos (bacterias y hongos) y puede ser atacada por alérgenos y sustancias tóxicas como endotoxinas, metales (Cr, Ni, Co) y otros aditivos de los fluidos de corte (por ejemplo: biocidas, inhibidores de la corrosión, agentes complejantes, emulsionantes) (Simpson *et al.*, 2003).

Casi el 70% de los casos de dermatitis producida por productos del petróleo está relacionado con el trabajar con fluidos de corte. Se estima que los fluidos de corte causan unos 41.000 casos de dermatitis al año (Hong y Broomer, 2000).

Para evitar los problemas cutáneos (Washington State Department of Labor and Industries, 2001) algunas de las prácticas de prevención que deben ser aplicadas son:

- Disminuir el contacto con los fluidos de corte: manteniendo la zona de trabajo limpia, incluyendo las máquinas y tener mecanismos de protección contra salpicaduras.
- Minimizar los efectos irritantes de los fluidos de corte: correctas diluciones de los aditivos, mantener el fluido en las especificaciones dadas por el fabricante (concentración y pH), asegurar la limpieza de los fluidos recirculándolos y filtrándolos para eliminar los contaminantes sólidos y evitar el uso de fluidos que han sido contaminados y que puedan tener un exceso de microorganismos.

CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES Y DESARROLLOS FUTUROS

5.1 Conclusiones

Los fluidos de corte desempeñan un rol importante en los procesos de mecanizado pero su uso tienen ciertas desventajas tanto por los efectos perjudiciales que produce en el medio ambiente y en la salud de los operarios como por los costes asociados que conlleva su uso por la adquisición de equipos, de fluidos y por el tratamiento de los residuos generados. Todo ello está forzando a las compañías a implementar sistemas de lubricación/refrigeración más eficientes y sostenibles.

Las técnicas alternativas a los fluidos de corte como el mecanizado en seco, el mecanizado con mínima cantidad de lubricante, los lubricantes/refrigerantes sólidos, la lubricación/refrigeración criogénica o mediante gases han sido implementadas en algunos procesos de mecanizado, siendo más eficaces y eficientes la convencional con fluidos de corte. Sin embargo, todavía hay aplicaciones en las que el uso de fluidos de corte no puede ser eliminado. El rendimiento de los sistemas de lubricación/refrigeración depende de muchas variables como son los parámetros de mecanizado, las herramientas de corte y el material de trabajo.

- La mejor alternativa medioambiental es el mecanizado en seco ya que elimina los fluidos de corte contaminantes y asegura una atmosfera segura para los trabajadores, aunque tiene muchas limitaciones en su aplicación. Para poder implantar esta alternativa es necesario un control exhaustivo de los parámetros del proceso de mecanizado y una elección adecuada de la herramienta.
- El mecanizado con mínima cantidad de lubricante reduce el uso de fluidos de corte y resulta ser la alternativa más viable teniendo en cuenta no solamente el impacto económico y medioambiental, sino también el rendimiento.
- Los lubricantes/refrigerantes sólidos son usados mayoritariamente en la industria aeroespacial aunque, para el proceso de mecanizado en combinación con el sistema de mínima cantidad de lubricante, su uso puede aumentar su capacidad de lubricación.
- Los lubricantes/refrigerantes criogénicos pueden alargar la vida de la herramienta, especialmente en el mecanizado de materiales difíciles de mecanizar. Su impacto medioambiental es menor que los fluidos de corte convencionales, aunque tiene un elevado coste inicial.
- El uso de gases como lubricantes/refrigerantes son sistemas con muy bajo impacto medioambiental, pero tienen limitaciones en su capacidad de lubricación y refrigeración.
- Los lubricantes sostenibles, base aceites vegetales son altamente biodegradables, ecológicos y pueden tener las mismas e incluso superiores propiedades tribológicas. Aunque su uso se

está extendiendo, actualmente representa una pequeña parte del mercado global de los lubricantes.

Los costes totales de producción son sensibles a los costes asociados al desgaste de las herramientas y al tiempo de mecanizado; ambos afectados por el tipo de sistema de lubricación/refrigeración empleado.

Para reducir el impacto ambiental se proponen varias alternativas:

- Cambiar los fluidos de corte por los sistemas de lubricación/refrigeración alternativos y/o modificar el sistema de aplicación.
- Reducir la cantidad de fluido de corte o usar el fluido de manera más efectiva. La vida útil del fluido de corte se puede incrementar con un correcto mantenimiento.
- Eliminar del fluido las sustancias químicas peligrosas para el medio ambiente y la salud de los trabajadores y sustituir los aceites minerales por vegetales o aceites sintéticos biodegradables.

5.2 Desarrollos futuros

Tras la elaboración del presente trabajo, se proponen una serie de desarrollos futuros para vencer los inconvenientes del sistema de lubricación/refrigeración convencional mediante fluidos de corte:

- Investigación y desarrollo de fluidos de corte sostenibles en aplicaciones para materiales no féreos (titanio, aluminio, magnesio, cobre, latón) y superaleaciones (níquel, cobalto).
- Desarrollo y formulación de fluidos vegetales para superar sus inconvenientes, como su baja estabilidad térmica y oxidativa.
- Desarrollo, formulación y producción de fluidos de corte carentes de sustancias peligrosas como el ácido bórico o las aminas secundarias, convencionalmente empleados debido a su bajo coste, y que mantengan las propiedades anticorrosivas y estabilizadores de pH.
- Investigar sobre el mecanizado con mínima cantidad de lubricante con materiales como el aluminio, el magnesio, el titanio y el acero, para evitar la adhesión en la herramienta.
- Investigación y desarrollo de nanofluidos y fluidos iónicos que están en pleno crecimiento como técnicas de lubricación y refrigeración alternativa.

BIBLIOGRAFÍA

- Adekunle, A. S., Adebisi, K. A., Durowoju, M. O. (2015). Performance evaluation of groundnut oil and melon oil as cutting fluids in machining operation. *Bulletin of Engineering*, 8(1) 97-100.
- Adler, D., Hii, W., Michalek, D., Sutherland, J. (2006). Examining the role of cutting fluids in machining and efforts to address associated environmental/health concerns. *Machining Science & Technology*, 10(1), 23-58.
- AENOR (2010). Aenor: <http://www.aenor.es>
- Alamin, B. B. (1996). *Tool life prediction and management for an integrated tool selection system*. Durham University, Durham.
- Al-Sabagh, A. M., Khalil, S. A., Abdelrahman, A., Nasser, M. M., Noor Eldin, M. R., Mishrif, M. R., El-Shafie, M. (2012). Investigation of oil and emulsion stability of locally prepared metalworking fluids. *Industrial Lubrication & Tribology*, 64(6), 346-358.
- Ambientum (2014). *Taladrinas agotadas*.
http://www.ambientum.com/revista/2004_07/TALADRINAS%20imprimir.htm
- Analiza Calidad. (2012).
<http://www.analizacalidad.com/docftp/fi1122iso14.htm>
- Anthony, M., Adithan, M. (2009). Determining the influence of cutting fluids on tool wear and surface roughness during turning of AISI 304 austenitic stainless steel. *Journal of Materials Processing Technology*, 209(2), 900-909.
- Aravind, A., Joy, M., Prabhakaran Nair, K. (2015). Lubricant properties of biodegradable rubber tree seed (*Hevea brasiliensis* Muell.Arg) oil. *Industrial Crops & Products*, 74(15), 14-19.
- ASELUBE (2014). *Lubricación y lubricantes*.
http://www.aselube.com/media/14309/m_dulo_1_lubricaci_n__y_lubricantes_revisada_mas.pdf
- ASELUBE (2014). *Memoria de actividades*. Madrid.
http://www.aselube.com/media/13199/memoria_aselube_2014.pdf
- Assenova, E., Majstorovic, V., Vencl, A., Kandeve, M. (2012). Green tribology and quality of life. *International Covention on Quality*, 1-9. Belgrade.
- Attanasio, A., Gelfi, M., C.Remino. (2006). Minimal quantity lubrication in turning: effect on tool wear. *Wear*, 260(3), 333-338.

- Beech, I., Bergel, A., Mollica, A., Flemming, H.-C. (2000). *Microbially influenced corrosion of industrial materials*. Biocorrosion network:
http://www.efcweb.org/efcweb_media/MICbook.pdf
- BOE. (2012). *Real Decreto 374/2001 de 6 de abril*.
- Boubekri, N., Shaikh, V. (2013). Minimum quantity lubrication (MQL) in machining. *Journal of Management & Engineering Integration*, 6(1), 51-61.
- Boubekri, N., Shaikh, V., Foster, P. R. (2010). A technology enabler for green machining: minimum quantity lubrication (MQL). *Journal of Manufacturing Technology Management*, 21(5), 556-566.
- Brinksmeier, E., Lucca, D., Walter, A. (2004). Chemical aspects of machining processes. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 53(2), 685-699.
- Brinksmeier, E., Meyer, D., Huesmann-Cordes, A., Herrmann, C. (2015). Metalworking fluids - mechanisms and performance. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 64(2), 605-628.
- Brutto, P. (2016). Controlling bacteria without boric acid. *Lubes'N'Greases*, 84, 21-24.
- Byers, J. P. (2006). *Metalworking fluids. Second edition*. CRC Press. STLE.
- Carou, D. (2013). *Estudio experimental para determinar la influencia de la refrigeración/lubricación en la rugosidad superficial en el torneado intermitente a baja velocidad de piezas de magnesio*. Tesis doctoral, UNED, Dpto. de Ingeniería de Construcción y Fabricación, Madrid.
- Carou, D., Rubio, E. M., Davim, J. P. (2015). A note on the use of the minimum quantity lubrication (MQL) system in turning. *Industrial Lubrication & Tribology*, 67(3), 256-261.
- Carrilero, M. (2002). A SEM and EDS insight into the BUL and BUE differences in the turning processes of AA2024 Al-Cu alloy. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 42(2), 215-220.
- Cheng, C., Phipps, D., Alkhaddar, R. M. (2005). Treatment of spent metalworking fluids. *Water research*, 39(17), 4051-4063.
- Costes, J. (2007). Tool-life and wear mechanisms of CBN tools in machining of Inconel 718. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 47(7), 1081-1087.
- Dahmus, J. B., Gutowski, T. G. (2004). An environmental analysis of machining. *ASME International Mechanical Engineering Congress and RD&D Expo*, 1-10. Anaheim.

- Dasch, J., Ang, C., Wong, C., Waldo, R., Chester, D., Cheng, Y., Konca, E. (2009). The effect of free-machining elements on dry machining of B319 aluminum alloy. *Journal of Materials Processing Technology*, 209(10), 4638-4644.
- Debnath, S., Reddy, M. M., Yi, Q. S. (2014). Environmental friendly cutting fluids and cooling techniques in machining: a review. *Journal of Cleaner Production*, 83, 33-47.
- Denis, J., Briant, J., Hipeaux, J. (2000). Physico-chemical properties. En *Lubricant properties*, 294-295. Paris: Technip.
- Devillez, A., Lesko, S., Mozer, W. (2004). Cutting tool crater wear measurement with white light interferometry. *Wear*, 256(1), 56-65.
- Dudzinski, D. (2004). A review of developments towards dry and high speed machining of Inconel 718 alloy. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 44(4), 439-456.
- Dugic, M., Kojic, B., Dugic, P., Dugic, C. (2013). Possibility of replacing the chlorinated paraffins in metalworking fluids. *Tribology in industry*, 35(4), 308-316.
- ECHA (2007). *European Chemicals Agency*. <http://echa.europa.eu/es/>
- EIA (2016). *U.S. Energy Information Administration*. <http://www.eia.gov/petroleum/>
- El Baradie, M. (1996). Cutting Fluids: Part 1. Characterisation. *Journal of Materials Processing Technology*, 56(1), 786-797.
- EPA (2000). *United States Environmental Protection Agency*. <https://www3.epa.gov/>
- EPA (2011). *Environmentally Acceptable Lubricants*. Washington: United States Environmental Protection Agency.
- Erhan, S. Z., Sharma, B. K., Perez, J. M. (2006). Oxidation and low temperature stability of vegetable oil-based lubricants. *Industrial Crops & Products*, 24(3), 292-299.
- Europeo, P. (25 de noviembre de 2009). Reglamento (CE) N° 1221/2009.
- FIUBA (2009). *Facultad de ingeniería de la UBA*. <http://materias.fi.uba.ar/7201/Lubricantes2009.pdf>
- Flores, C. (2015). *Análisis del desgaste progresivo en la herramienta de maquinado utilizando la ecuación de Taylo*. Universidad Nacional Autónoma de México, México.
- Fratila, D. (2010). Macro-level environmental comparison of near-dry machining and flood machining. *Journal of Cleaner Production*, 18(10), 1031-1039.
- Future market insights. (2016). *Industrial Lubricants Market: Global Industry Analysis & Opportunity Assessment 2015-2025*. <http://www.futuremarketinsights.com/reports/industrial-lubricants-market>

- Galán, M. (2010). *Optimización del proceso de tallado por generación mediante sistema MQL*. Universidad Carlos III de Madrid, Ingeniería mecánica. Madrid: Universidad Carlos III de Madrid.
- Gangopadhyay, S., Acharya, R., Chattopadhyay, A. K., Sargade, V. G. (2010). Effect of cutting speed and surface chemistry of cutting tools on the formation of BUL or BUE and surface quality of the generated surface in dry turning of AA6005 aluminium alloy. *Machining Science & Technology*, 14(2), 208-223.
- García, A. (2011). *Diseño, selección y producción de nuevos biolubricantes*. Tesis Doctoral, Institut químic de Sarrià, Barcelona.
- Geeley, M., Rajagopalan, N. (2004). Impact of environmental contaminants on machining properties of metalworking fluids. *Tribology International*, 37(4), 327-332.
- Generalitat Valenciana. (2002). *Planes de prevención de residuos peligrosos para la industria*. Valencia: IMPIVA.
- Grand View Research. (2016). *Lubricant additives market analysis by product, by application, industrial and segment forecasts to 2024*.
<http://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/lubricant-additives-market>
- Grand View Research. (2016). *Lubricants market analysis and segment forecasts to 2022*. San Francisco: Market research & consulting.
- Groover, M. P. (2007). *Fundamentos de manufactura moderna* (3^o ed.). McGraw-Hill.
- Heine, H. J. (1998). Dry machining - a promising option. *Foundary Management & Technology*, 126(8), 44-49.
- Heras Saizarbitoria, I., Arana Landín, G., Molina Azorín, J. F. (04 de 2008). *EMAS versus ISO 14001*.
<http://www.sc.ehu.es/oewhesai/material%202008/BICE%20EMAS%20ISO%2014.pdf>
- Hong, S. Y. (2006). Lubrication mechanisms of LN2 in ecological cryogenic machining. *Machining Science & Technology*, 10(1), 133-155.
- Hong, S. Y., Broomer, M. (2000). Economical and ecological cryogenic machining of AISI 304 austenitic stainless steel. *Clean Technologies & Environmental Policy*, 2(3), 157-166.
- Hubbard, K. M., Callahan, R. N., Strong, S. D. (2008). A standardized model for the evaluation of machining coolant/lubricant costs. *Intenational Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 36(1), 1-100.
- Husnawan, M., Masjuki, H., Mahlia, T. (2011). The interest of combining two additives with palm olein as selected lubricant components. *Industrial Lubrication & Tribology*, 63(3), 203-209.

- Hutchings, I. M. (2016). Leonardo da Vinci's studies of friction. *Wear*, 360-361, 51-66.
- IARC (2006). *International Agency for Research on Cancer*. <http://www.iarc.fr>
- IHOBE (1999). *Libro blanco de minimización de residuos y emisiones. Mecanizado de metal*. http://www.istas.net/risctox/gestion/estructuras/_3227.pdf
- IHS (2015). *Lubricating oil additives*. <https://www.ihs.com/products/chemical-lubricating-oil-scup.html>
- INSHT (2012). *Exposición dérmica y resgos para la salud*. Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo.
- Irani, R. (2005). A review of cutting fluid application in the grinding process. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 45(15), 1696-1705.
- ISTAS. (2001). *Fluidos de corte*. Proyecto FITTEMA: http://www.istas.net/risctox/gestion/estructuras/_3087.pdf
- Jayal, A. D., Balaji, A. (2009). Effects of cutting fluid application on tool wear in machining: interactions with tool-coatings and tool surface features. *Wear*, 267(9), 1723-1730.
- Jayal, A. D., Balaji, A., Sesek, R., Gaul, A., Lillquist, D. R. (2007). Machining performance and health effects of cutting fluid application in drilling of A390.0 cast aluminum alloy. *Journal of Manufacturing Processes*, 9(2), 137-146.
- Kamalakar, K., Sai Manoj, G., Prasad, R., Karuna, M. (2015). Influence of structural modification on lubricant properties of sal fat-based lubricant base stocks. *Industrial Crops & Products*, 76, 456-466.
- Klocke, F., Massmann, T., Gerschwiler, K. (2005). Combination of PVD tool coatings and biodegradable lubricants in metal forming and machining. *Wear*, 259(7), 1197-1206.
- Latorre, N., Silvestre, J., Monteagudo, A. (2011). Dermatitis de contacto alérgica por formaldehído y liberadores de formaldehído. *Derma-Sifiliográficas*, 2(102), 86-97.
- Lawal, S., Choudhury, I., Nukman, Y. (2012). Application of vegetable oil-based metalworking fluids in machining ferrous metals. A review. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 52(1), 1-12.
- Lawal, S., Choudhury, I., Nukman, Y. (2013). Developments in the formulation and application of vegetable oil-based metalworking fluids in turning process. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 67(5), 1765-1776.
- Li, R. (2007). *Experimental and numerical analysis of high-throughput drilling of titanium alloys*. University of Michigan, Mechanical Engineering. Michigan: University of Michigan.
- Lumar-Química. (2013). <http://www.lumarquimica.com/es/index.php>

- Madanchi, N., Kurle, D., Winter, M., Thiede, S., Herrmann, C. (2015). Energy efficient process chain: the impact of cutting fluid strategies. *Procedia CIRP*, 29, 360-365.
- Martín, A. (2010). *Uso de polímeros reciclados y convencionales como modificadores de las propiedades reológicas de grasas lubricantes*. Huelva: Universidad de Huelva.
- Massawe, E., Geiser, K. (2012). The dilemma of promoting green products: what we know and don't know about biobased metalworking fluids. *Journal of Environmental Health*, 74(8), 8-16.
- Matuszewska, A., Gradkowski, M. (2007). Antiwear action of mineral lubricants modified by conventional and unconventional additives. *Tribology Letters*, 27(2), 177-180.
- Merenson, C. (2001). *Estrategia nacional de desarrollo sustentable*.
<http://www.ambiente.gov.ar/archivos/web/DNRNyCB/File/ends.pdf>
- Minton, T., Ghani, S., Sammler, F., Bateman, R., Fürstmann, P., Roeder, M. (2013). Temperature of internally-cooled diamond-coated tools for dry-cutting titanium. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 75, 27-35.
- Morehead, M., Haung, Y., Hartwig, K. T. (2007). Machinability of ultrafine-grained copper using tungsten carbide and polycrystalline diamond tools. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 47(2), 286-293.
- Muniz, C., Dantas, T., Moura, E., Dantas Neto, A., & Gurgel, A. (2008). Novel formulations of cutting fluids using naphthenic basic oil. *Brazilian Journal of Petroleum & Gas*, 2(4), 143-153.
- Nagendramma, P., Kaul, S. (2012). Development of ecofriendly/biodegradable lubricants: an overview. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 16(1), 764-774.
- Najiha, M., Rahman, M., Yusoff, A. (2016). Environmental impacts and hazards associated with metal working fluids and recent advances in the sustainable systems: a review. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 60, 1008-1031.
- Narváez, D. M. (2012). Mecanismos de desgaste en herramientas de conformado con recubrimientos de TiAlN por medio de sistemas PAPVD. Colombia.
- Neto, O. P., Abia, A. I., Garcia, J. B. (2013). Alternativas al mecanizado con taladrina. *MetalMecanica*.
- NIOSH (2013). *Centers for disease control and prevention*.
<http://www.cdc.gov/niosh/topics/metalworking/>
- Norrby, T. (2003). Environmentally adapted lubricants - where are the opportunities? *Industrial Lubrication & Tribology*, 55(6), 268-274.

- Nouari, M., List, G., Girot, F., Coupard, D. (2003). Experimental analysis and optimisation of tool wear in dry machining of aluminium alloys. *Wear*, 255(7), 1359-1368.
- Ortuzar, M., Alberdi, J. A. (2012). *Identificación del método de lubricación*. Tecnalia <http://industria.hre.es/news/1401811159/mql-informe-final-tecnalia.pdf>
- OSHA. (2001). *Metalworking fluids: safety and health best practices manual*.
- Park, C.-W., Kwon, K.-S., Kim, W.-B., Min, B.-K., Park, S.-J., Sung, I.-H., Seok, J. (2009). Energy consumption reduction technology in manufacturing - a selective review of policies, standards, and research. *International Journal of Precision Engineering & Manufacturing*, 10(5), 151-173.
- Pirso, J., Viljus, M., Letunovits, S., Juhani, K., Joost, R. (2011). Three-body abrasive wear of cermets. *Wear*, 21(11-12), 2868-2878.
- Portugal, R. (2005). *Vida útil de la herramienta de corte*. Universidad de San Martín de Porres, Ingeniería industrial, Lima.
- Roche Y, J., González C., J. M., González P, E., Arango, P. J., Sequeda, F. (2012). Lubricantes sólidos: del espacio exterior al taller metalmecánico. *Metal Actual*, 23, 56-59.
- Rodríguez, F. (2011). *Formulación de fluidos de corte semisintéticos y sintéticos como sustitutos de fluidos solubles*. Sartenejas: Universidad Simón Bolívar.
- Sánchez, J., Pombo, I., Alberdi, R., Izquierdo, B., Ortega, N., Plaza, S., & Martínez-Toledano, J. (2010). Machining evaluation of a hybrid MQL-CO₂ grinding technology. *Journal of Cleaner Production*, 18(18), 1840-1849.
- Sánchez, M., Glanzer, P., Pérez, J., García, C., Moreno, B. (2010). Determination of antioxidants in new and used lubricant oils by headspace-programmed temperature vaporization-gas chromatography-mass spectrometry. *Analytical and bioanalytical chemistry*, 398(7), 3215-3224.
- Sandvik. (2007). *Detección de problemas y desgaste*. <http://www.sandvik.coromant.com/es-es/knowledge/drilling/wear-and-troubleshooting/wear-types/pages/default.aspx>
- Schwarz, M., Dado, M., Hnilica, R., Veverková, D. (2015). Environmental and health aspects of metalworking fluid use. *Polish Journal of Environmental Studies*, 24(1), 37-45.
- Sharif, S., Yusof, N., Idris, M., Ahmad, Z., Sudin, I., Ripin, A., MatZin, M. (2009). *Feasibility study of using vegetable oil as a cutting lubricant through the use of minimum quantity lubrication during machining*. Universiti Teknologi Malaysia, Department of Manufacturing and Industrial Engineering. Johor Bahru: Universiti Teknologi Malaysia.
- Sharma, V. S. (2009). Cooling techniques for improved productivity in turning. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 49(6), 435-453.

- Shashidhara, Y., Jayaram, S. (2010). Vegetable oils as a potential cutting fluid - an evolution. *Tribology International*, 43(5-6), 1073-1081.
- Shell, C. T. (2013). *Lubricación y lubricantes*. Academia
http://www.academia.edu/5187354/Lubricación_y_Lubricantes
- Shi, M., Lane, B., Mooney, C., Dow, T., Scattergood, R. (2010). Diamond tool wear measurement by electron-beam-induced deposition. *Precision Engineering*, 34(4), 718-721.
- Shokrani, A., Dhokia, V., Newman, S. (2012). Environmentally conscious machining of difficult-to-machine materials with regard to cutting fluids. *International Journal of Machine Tools in Manufacture*, 57, 83-101.
- Simpson, A., Stear, M., Groves, J., Piney, M., Bradley, S., Stagg, S., Crook, B. (2003). Occupational exposure to metalworking fluid mist and sump fluid contaminants. *The Annals of occupational hygiene*, 47(1), 17-30.
- Siniawski, M., Bowman, C. (2009). Metal working fluids: finding green in the manufacturing process. *Industrial Lubrication & Tribology*, 61(2), 60-66.
- Skerlos, S. J., Zhao, F. (2003). Economic considerations in the implementation of microfiltration for metalworking fluid biological control. *Journal of Manufacturing Systems*, 22(3), 202-219.
- Skerlos, S. J., Hayes, K. F., Clarens, A. F., Zhao, F. (2008). Current advances in sustainable metalworking fluids research. *International Journal of Sustainable Manufacturing*, 1(1/2), 180-202.
- Sokovic, M., Mijanovic, K. (2001). Ecological aspects of the cutting fluids and its influence on quantifiable parameters of the cutting processes. *Journal of Materials Processing Technology*, 109(1), 181-189.
- Sreejith, P., Ngoi, B. (2000). Dry machining: machining of the future. *Journal of Materials Processing Technology*, 101(1), 287-291.
- Standford, M., Lister, P. (2002). The future role of metalworking fluids in metal cutting operations. *Industrial Lubrication & Tribology*, 54(1), 11-19.
- Statista (2016). *The Statistics Portal*. <http://www.statista.com/>
- Tan, X., Liu, F., Cao, H., Zhang, H. (2002). A decision-making framework model of cutting fluid selection for green manufacturing and a case of study. *Journal of Materials Processing Technology*, 129(1), 467-470.
- Terradillos, J. (2013). *El potencial oculto de la lubricación industrial*. Lubrication management:
<http://lubrication-management.com/2013/07/16/o-potencial-oculto-da-lubrificacao-industrial/>

- Terradillos, J., Ciria, J. I. (2014). *Pasado, presente y futuro de la lubricación*. IK4 Tekniker.
- Ting, C.-C., Chen, C.-C. (2011). Viscosity and working efficiency analysis of soybean oil based bio-lubricants. *Measurement*, 44(8), 1337-1341.
- Tocci, L. (2016). Sustainability is the final frontier. *Lubes'n'greases*, 22(5), 39-43.
- Tomala, A., Karpinska, A., Werner, W., Olver, A., Störi, H. (2010). Tribological properties of additives or water-based lubricants. *Wear*, 269(11), 804-810.
- Townsend, M. (01 de 2016). Macroeconomic factors shape Middle East markets. *Lubes'N'Greases*, 79, 24-30.
- Trafny, E., Lewandowski, R., Kozłowska, K., Zawistowska-Marciniak, I., & Stepinska, M. (2015). Microbial contamination and biofilms on machines of metal industry using metalworking fluids with or without biocides. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 99, 31-38.
- Tsai, M.-Y., Jian, S.-X. (2012). Development of a micro-graphite impregnated grinding wheel. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 56, 94-101.
- Umejei, E. (2016). Africa ponders biolubes' potential. *Lubes'N'Greases*, 79, 38.
- Universitat Politècnica de València. (2012). *Manual de seguridad y salud en operaciones con herramientas manuales comunes, maquinaria de taller y soldadura*. Servicio integrado de prevención en riesgos laborales:
<https://www.sprl.upv.es/msherramientas1.htm>
- USGS (2014). *Estimated Use of Water in the United States in 2010*. (U. D. Interior, Ed.)
 Obtenido de <http://pubs.usgs.gov/circ/1405/pdf/circ1405.pdf>
- Velkavrh, I., Mitjan, K. (2012). Comparison of the effects of the lubricant-molecule chain length and the viscosity on the friction and wear of diamond-like-carbon coatings and steel. *Tribology International*, 50, 57-65.
- Washington State Department of Labor and Industries. (2001). *Prevention of skin problems when working with metalworking fluids*. Safety & health assessment & research for prevention, Washington.
- Weinert, K., Inasaki, I., Sutherland, J., Wakabayashi, T. (2004). Dry machining and minimum quantity lubrication. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 53(2), 511-537.
- Wentz, J., Kappor, S., De Vor, R., Rajagopalan, N. (2006). Development of a novel metalworking fluid engineered for use with microfiltration recycling. *Journal of Tribology*, 129(1), 135-142.

- Winter, M., Li, W., Kara, S., Herrmann, C. (2014). Stepwise approach to reduce the costs and environmental impacts of grinding processes. (S. London, Ed.) *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 71(5), 919-931.
- Winter, M., Thiede, S., Herrmann, C. (2015). Influence of the cutting fluid on process energy demand and surface roughness in grinding - a technological, environmental and economic examination. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 77(9-12), 2005-2017.
- Yepes, J. d. (2012). Lubricantes sólidos: del espacio exterior al taller metalmecánico. *Metal Actual*, 23, 56-59.
- Zeka, A., Eisen, E., Gore, R., Wegman, D. (2004). Risk of upper aerodigestive tract cancers in a case-cohort study of autoworkers exposed to metalworking fluids. (B. M. Association, Ed.) *Occupational & Environmental Medicine*, 61(5), 426-431.
- Zhang, S., Li, J., Wang, Y. (2012). Tool life and cutting forces in end milling Inconel 718 under dry and minimum quantity cooling lubrication cutting conditions. *Journal of Cleaner Production*, 32, 81-87.
- Zhao, F., Ogaldez, J., Sutherland, J. W. (2012). Quantifying the water inventory of machining processes. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 61(1), 67-70.
- Zhong, Q., Rohwerder, M., Zhang, Z. (2004). Study of lubricants and their effect on the anti-corrosion performance as temporarily protective oil coatings. *Surface & Coatings Technology*, 185(2-3), 234-239.
- Zhou, L., Li, J., Li, F., Meng, Q., Li, J., Xu, X. (2016). Energy consumption model and energy efficiency of machine tools: a comprehensive literature review. *Journal of Cleaner Production*, 112, 3721-3734.
- Zhu, L., Peng, S.-S., Yin, C.-L., Jen, T.-C., Cheng, X., Yen, Y.-H. (2014). Cutting temperature, tool wear, and tool life in heat-pipe-assisted end-milling operations. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 72(5), 995-1007.
- Zhuang, K., Zhang, X., Zhu, D., Ding, H. (2015). Employing preheating- and cooling-assisted technologies in machining of Inconel 718 with ceramic cutting tools: towards reducing tool wear and improving surface integrity. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 80(9-12), 1815-1822.

CURRÍCULUM VITAE

Datos personales

Nombre y apellidos: Elisabet Benedicto Bardolet

Correo electrónico: betbenedicto@gmail.com

Situación profesional actual

Organismo: Acondicionamiento Tarrasense (Centro Tecnológico Leitat)

Depto./Secc./Unidad estr.: R&D / TMP (Tribology and Metal Pretreatment)

Dirección postal: C/ de Innovació, 2. 08225 Terrassa

Especialización (Códigos UNESCO): 3303, 3310

Líneas de investigación

Sector de Gran Consumo (Fast Moving Consumer Goods): Laundry& home Care

Sector de Pre-tratamiento de metales (Metal Pretreatment) y Lubricantes (Taladrinas)

Formación Académica

Licenciatura en Ingeniería Industrial (2005-2011) en el Instituto Químico de Sarrià (URL)

Licenciatura en Ingeniería Química (2005-2010) en el Instituto Químico de Sarrià (URL)

Experiencia profesional

- Acondicionamiento Tarrasense, desde septiembre de 2011 hasta Actualidad
- ProcessSystems Enterprise (London), desde julio de 2010 hasta octubre de 2010
- AffinityPetcare, desde Julio 2009 hasta octubre de 2009
- AutelSistemas, desde Julio de 2008 hasta octubre de 2008

Idiomas (R = regular, B = bien, C = correctamente)

Idioma	Habla	Lee	Escribe
Castellano	C	C	C
Catalán	C	C	C
Inglés	C	C	C
Francés	R	R	R

Participación en Proyectos de I+D financiados en convocatorias públicas.

Título del proyecto: *Nuevas tecnologías para un sistema eficiente, ecológico e inteligente de lavado de los textiles del futuro* (SEILA)

Entidad financiadora: CENIT 2009

Estancias en Centros extranjeros

Centro: Process Systems Enterprise (Londres)

Fecha: 2010 Duración: 12 semanas

Tema: Investigación y desarrollo de proyectos mediante la simulación de procesos industriales con el software gPROMS

Contribuciones a Congresos

Autores: E. Delgado, E. Benedicto, R. Escudero, K. Mayahara

Título: Use of MMB in cleaning and washing formulations

Congreso: WFK- International Detergency Conference (International Detergency Conference 46th IDC)

Lugar celebración: Düsseldorf (Germany) Fecha: 9-11 abril 2013

Otros méritos o aclaraciones que se desee hacer constar

Curso de liderazgo y gestión de equipos (Terrassa). 8h. 14-15 junio 2016

Curso gestión del tiempo (Terrassa). 8h. 25-26 mayo 2016

Curso sobre la implantación de la ISO 17025 (Terrassa). 8h. 21 julio 2015

Curso de supervisores para instalaciones radiactivas (Barcelona). 80h. 25 junio – 4 julio 2013

Procesos de galvanizado. CTM. Manresa (Barcelona). 8h. 19 junio 2013

Lubricant training. Düsseldorf (Germany). 80h. 5-13 junio 2013

Metal Pretreatment Training. Düsseldorf (Germany). 80h. 11-22 marzo 2013

Gestión de proyectos. EuncetBusiness School. Terrassa (Barcelona). 32h. 12 abril 2012

Obligaciones derivadas de REACH. Terrassa (Barcelona). 8h. 20 diciembre 2011