



**Universidad de Valladolid**



**ESCUELA DE INGENIERÍAS  
INDUSTRIALES**

**UNIVERSIDAD DE VALLADOLID**

**ESCUELA DE INGENIERIAS INDUSTRIALES**

**Grado en Ingeniería Química**

# **Diseño de una Planta de Tratamiento de Aceites de Corte Agotados**

**Autor:**

**Otero Lajo, Diego**

**Tutor(es):**

**Mato Chaín, Rafael  
Ingeniería Química**

**Valladolid, octubre 2020.**



## Resumen.

Las industrias avanzan cada vez más decididas a tener procesos más verdes y generar menos residuos. Es en este marco en el que se emplaza este anteproyecto. En una industria donde no se puede evitar generar el residuo, éste debe ser tratado de la forma más eficaz posible.

Por esto, se propone un diseño para una planta de tratamiento de aceites de corte agotados, para sustituir una terminal de vertidos de la industria automotriz, antigua y deficiente. La nueva planta posee una capacidad de tratamiento nominal de  $95,76 \frac{m^3}{día}$  frente a los  $70 \frac{m^3}{día}$  de la actual, en un proceso continuo, generando una corriente de aceite revalorizable de  $6,72 \frac{m^3}{día}$ , con una concentración final de residuo seco del 95% en peso, lo que hace que su retirada tenga coste 0.

Además, se genera una corriente de destilado de alta calidad, de  $89 \frac{m^3}{día}$ , que se devuelve a la red de agua industrial creando un circuito cerrado con vertido 0.

Palabras clave: Taladrina, aceites, residuo, evaporación, termocompresión.

## Abstract.

Industry nowadays is evolving towards greener process and generating less wastes. Is in this framework in which this project locates. In an industry in which producing a waste is inevitable, the aim is to develop a treatment as effective as possible.

Because of this, a design for cutting fluid wastes is proposed, with the goal of replacing an old and inefficient waste terminal by these fluids. The new plant has a nominal capacity of treatment of  $95,76 \frac{m^3}{day}$  in comparison to the  $70 \frac{m^3}{day}$  of the old one, in a continuous process, generating a stream of valuable cutting oil of  $6,72 \frac{m^3}{day}$ , with a concentration of the 0,95 in weight of dry waste, making it's pick up free-

Furthermore, the process generates a stream of distillate water of high quality, of  $89 \frac{m^3}{day}$ , which is returned to the industrial water network, creating a closed circuit, with no dumping.

Keywords: Metalworking fluids, oils, waste, evaporation, thermocompression.



## ÍNDICE

Resumen.....	3
Abstract.....	3
1. Introducción.....	9
1.1. Contextualización.....	9
1.2. Descripción, características y propiedades de los Aceites de Corte.....	11
1.3. Residuos de Taladrinas.....	14
2. Objetivos.....	17
2.1. Descripción de la instalación a reemplazar.....	17
2.2. Capacidad de la planta.....	18
2.3. Especificaciones.....	18
3. Bases de Diseño.....	19
3.1. Bases de diseño de proceso.....	19
3.2. Casos de diseño.....	19
3.3. Utilidades disponibles.....	20
3.4. Diseño del proceso.....	20
3.5. Códigos y legislación aplicable.....	20
3.6. Datos climatológicos.....	21
4. Localización de la planta.....	23
5. Alternativas y selección del proceso.....	25
5.1. Rotura química con sales inorgánicas y polímeros orgánicos.....	25
5.2. Ultrafiltración.....	28
5.3. Evaporación.....	30
Evaporación por bomba de calor.....	31
Evaporación por termocompresión.....	31
5.4. Electro-floculación.....	32
5.5. Comparación y selección del proceso.....	32
6. Descripción del Proceso.....	35
6.1. Diagrama de Bloques.....	35
6.2. Descripción General.....	35
6.3. Arranque del Proceso.....	36
6.4. Diagrama de Flujo.....	36
6.5. Balances de Materia.....	37
6.6. Descripción Detallada.....	38
6.7. Integración Energética.....	40

7. Equipo.....	41
7.1. Hojas de Especificación.....	41
7.2. Diseño Detallado de equipos.....	41
8. Instrumentación y Control.....	43
8.1. Estrategia de control.....	43
8.2. Diagramas de Instrumentación y Control (P&ID).....	43
8.3. Lista de Lazos de Control e instrumentos.....	44
8.4. Lazos Críticos.....	45
9. Seguridad y Salud Laboral.....	47
10. Impacto Ambiental.....	49
10.1. Materias Primas.....	49
10.2. Efluentes.....	49
11. Evaluación económica.....	51
12. Bibliografía.....	55

ANEXO I - Balances de Materia

ANEXO II - Diseño de Equipos

ANEXO III - Integración Energética

ANEXO IV - Lista de Lazos de Control

ANEXO V - Análisis HAZOP

ANEXO VI - Fichas de Seguridad

ANEXO VII - Planos

## Índice de Tablas.

Tabla 1 Conductividad térmica y calor específico para el aceite mineral y el agua .....	12
Tabla 2 Aditivos más comunes para taladrinas. ....	13
Tabla 3. Alimentación a proceso .....	19
Tabla 4. Propiedades físicas de la corriente de alimentación. ....	19
Tabla 5. Referencia de unidades SI.....	21
Tabla 6.Tabla de datos de temperatura 2019.....	21
Tabla 7. Comparación de las tecnologías disponibles .....	33
Tabla 8. Datos de corrientes HIX.....	40
Tabla 9. Composición de efluente gaseoso.....	50
Tabla 10. Composición efluente líquido.....	50
Tabla 11.Costes de amortización .....	54

## Índice de Ilustraciones.

Ilustración 1. Clasificación de los fluidos de corte de acuerdo con DIN 51385.....	14
Ilustración 2. Gráfico de temperaturas Valladolid 2019.....	21
Ilustración 3. Gráfico de precipitaciones Otoño 2019 .....	22
Ilustración 4. Laguna de Duero - Renault - Valladolid .....	23
Ilustración 5. Actual Terminal de Vertidos.....	23
Ilustración 6. Factoria Motores Renault .....	23
Ilustración 7. Acción de los coagulantes catiónicos neutralizando las cargas superficiales de las gotas de aceite en una emulsión de aceite en agua.....	26
Ilustración 8. Tratamiento de rotura química - Método Continuo (Burke, 2006) .....	27
Ilustración 9. Tratamiento de rotura química - Método Batch (Burke, 2006) .....	28
Ilustración 10. Esquema básico de un sistema de ultrafiltración (Kemmer, 1998).....	29
Ilustración 11 Membrana de canal ancho (modelo de CITME, 2006).....	29
Ilustración 12 Membrana enrollada en espiral (modelo de CITME, 2006) .....	30
Ilustración 13. Costes de operació anuales. ....	53

## Índice de Gráficas.

Gráfico 1. Previsión de costes anuales .....	53
Gráfico 2. Amortización.....	54



# 1. Introducción.

## 1.1. Contextualización.

El hombre, con el paso del tiempo, va dejando su marca en el territorio que habita. Sin embargo, esto se ha potenciado desde la expansión de los procesos industriales.

Desde 1992, en la Cumbre de Río, la ONU (Organización de las Naciones Unidas), ha buscado que la sociedad evolucione conforme a un desarrollo sostenible. Precisamente en esa cumbre, los países participantes se comprometieron a regular y a reducir el impacto negativo del crecimiento industrial sobre nuestro planeta.

En la parte tocante a las industrias, las principales consecuencias medioambientales derivadas de los procesos industriales son:

- Contaminación: derivada de los vertidos y efluentes generados, que afectan principalmente a la calidad del aire y del agua, entre otros.
- Agotamiento de Recursos: debido a los ritmos productivos actuales, las reservas de ciertos recursos no renovables empiezan a verse mermadas, y en cuanto a los recursos renovables, en el caso de algunos no se respetan los plazos para que la naturaleza pueda regenerarlos.

Por estos motivos, y debido a las legislaciones cada vez más restrictivas en el ámbito medioambiental, la industria está evolucionando hacia un modelo de economía circular más sostenible, donde se prima la eficiencia y la eficacia. Además, este tipo de modelo también afecta a las empresas desde el punto de vista de cómo las ve la sociedad, de forma que las hace más atractivas, y, además, se reducen también los costes asociados al tratamiento de los residuos, efluentes y vertidos generados.

Los aceites usados constituyen uno de los residuos industriales considerados como peligrosos por la *Lista de Residuos Peligrosos (LER)*, cuyo tratamiento está regulado y el cual se regenera para obtener un producto apto de nuevo para el mercado (bases lubricantes) o para ser empleado como fuente de energía (empleándolo como un combustible similar al fueloil). Se estima que el consumo de este tipo de aceites puede estar en torno a los 49 millones de metros cúbicos al año (Ilissi Monteiro, 2006).

En algunos sectores, la legislación atribuye a los fabricantes la responsabilidad de hacerse cargo de los residuos en los que se convierten los productos que comercializan, aplicando el llamado "principio de responsabilidad del productor". Para cumplir con esta responsabilidad (que se concreta en la obligación de financiar la recogida y tratamiento

del residuo), los fabricantes tienen la posibilidad de hacerlo de forma agrupada, a través de sistemas integrados de gestión, también llamados SIG. Así pues, los SIG son sistemas creados por los fabricantes de un determinado producto. Este es el caso de los aceites usados, cuyos fabricantes se agrupan en SIGAUS (Sistema Integrado de Gestión de Aceites Usados).

Según el propio SIGAUS, durante el año 2016, se recogieron 170.436 toneladas de aceites usados en España ([Observatorio del Aceite Usado, 2020](#)).



No obstante, para su recogida estos aceites deben cumplir unos ciertos parámetros, que faciliten su regeneración, de forma que desde SIGAUS, se aportaran unos 12 €/t de aceite recogido que cumpla con dichas especificaciones ([SIGAUS, 2020](#)). En el caso contrario, la entidad que haya generado este residuo deberá pagar para su retirada y posterior pretratamiento en la planta de regeneración del gestor autorizado.

Dentro de este grupo de residuos, encontramos los aceites de corte empleados para el mecanizado de piezas metálicas, empleados en la industria siderúrgica o automotriz, comúnmente conocidos como taladrinas. Estos compuestos generalmente están diluidos en grandes porcentajes de agua, que debe ser eliminada para su recogida como un aceite valorizable, y poder así beneficiarse del canon de gestión.

En industrias en las que se generan residuos de taladrinas en grandes cantidades, una posible opción es implementar una planta de postratamiento para tratar estos residuos hasta cumplir con las especificaciones para su retirada a coste cero, o incluso percibir un beneficio por su retirada, dependiendo del porcentaje de agua final.

## 1.2. Descripción, características y propiedades de los Aceites de Corte.

De acuerdo con DIN 51 385, los refrigerantes (o fluidos de corte) son sustancias que se utilizan para la refrigeración y lubricación durante el corte y los materiales de formación.

Estos compuestos desarrollan un rol importante en las operaciones de mecanizado por arranque de viruta en la industria mecánica, de forma que muchas de éstas no podrían llevarse a cabo de forma eficiente sin su ayuda. Empleados de forma adecuada, estos fluidos pueden aumentar la productividad y reducir costes haciendo posible el uso de velocidades de corte y de movimiento de la herramienta mayores, así como mayores profundidades de corte. Además, pueden alargar la vida útil de la herramienta, reducir la aspereza del material, mejorar la precisión o reducir el consumo energético (El-Baradie, 1996).

Estos fluidos tienen 3 funciones básicas que afectan al proceso de mecanizado, y en función de las cuales variará su composición:

- **Refrigeración.**

Se requiere con el fin de evitar un aumento de temperatura en la posición de trabajo y asegurar unas condiciones óptimas.

Un aumento en la temperatura implica un mayor desgaste y una disminución de la vida útil de la herramienta, debido a la pérdida de resistencia ocasionada por la temperatura (Estrems Amestoy, 2007).

En cuanto a la pieza a mecanizar, un calentamiento excesivo puede afectar a sus propiedades por cambios en su microestructura debido a efectos térmicos, pudiendo generar tensiones en el material.

También puede afectar a la precisión del mecanizado, al trabajar con una pieza dilatada, que a temperatura ambiente puede contraerse (Estrems Amestoy, 2007).

Las taladrinas se aplican sobre el conjunto pieza-herramienta, por gravedad o a la presión adecuada, para retirar el calor generado por el contacto. Estos fluidos deben ser capaces no solo de absorber el calor generado, sino también de liberarlo rápidamente. Esto se consigue gracias a la alta conductividad térmica y a su alto calor específico.

Esta propiedad será más relevante cuando sean necesarias altas velocidades de corte (El-Baradie, 1996).

- **Lubricación.**

Otra de las características principales de los aceites de corte es que reducen la fricción generada durante el proceso de corte interponiéndose entre la viruta y la herramienta.

La fricción que ocurre entre 2 superficies que están en movimiento relativo genera desgaste por las asperezas que entran en contacto y a su vez producen un incremento considerable en la temperatura. El desgaste producido se refleja como pequeñas partículas metálicas desprendidas que a su vez generan un desgaste mayor, modificando las tolerancias de los elementos de la máquina. Lo anterior se traduce en ruido, deterioro de los equipos, gastos de mantenimiento y reducción en la producción.

El efecto lubricante se consigue normalmente empleando aceites minerales, que poseen una viscosidad suficiente como para mantener una capa de fluido de un espesor tal que no permita el contacto metal-metal ni sea un freno para la operación de mecanizado.

Será la característica a tener en cuenta en procesos a bajas velocidades de corte.

- **Evacuación de viruta.**

Es indispensable también que estos fluidos sean capaces de arrastrar la viruta que se genera en el mecanizado, para evitar el efecto abrasivo de las mismas y que no entorpezcan la operación.

El agua, aunque se muestra como un buen refrigerante y de bajo coste, es un lubricante bastante pobre, que no se ha mostrado efectivo reduciendo la fricción entre la pieza y la herramienta, y eliminando la viruta generada. Además, tiene un efecto corrosivo sobre metales ferrosos, por lo que en ciertas piezas no puede emplearse sola.

Por otro lado, los aceites lubricantes, como por ejemplo aceites minerales, son excelentes eliminando fricciones, reduciendo las asperezas superficiales y no son corrosivos. No obstante, su capacidad para eliminar el calor puede ser de 3 a 4 veces inferior a la del agua en algunos casos.

	<b>Aceite mineral</b>	<b>Agua</b>
<b>Capacidad calorífica [kW/kg·K]</b>	Aprox. 1.9	4.2
<b>Conductividad térmica [W/m·K]</b>	Aprox. 0.1	0.6

*Tabla 1 Conductividad térmica y calor específico para el aceite mineral y el agua*

También hay que tener en cuenta que, al ser fluidos generalmente viscosos, su aplicación por gravedad o a presión es más complicada.

Por estos motivos, la composición de las taladrinas es altamente variable, admitiendo una gran variedad de aditivos, pero teniendo siempre en cuenta que el mejor refrigerante es el agua y el mejor lubricante es el aceite. La composición vendrá en gran medida determinada por la cantidad de calor generado.

Las taladrinas, podrán presentar todas o parte de las sustancias enumeradas a continuación ([IHOBE, Sociedad Publica de Gestión Ambiental, 1999](#)):

<b>TIPOS DE COMPUESTOS</b>	<b>COMPUESTOS MAS EMPLEADOS</b>
<b>Refrigerantes</b>	Agua
	Aceite mineral (nafténicos, parafínicos...)
<b>Lubricantes</b>	Aceite vegetal/Animal (aceites de colza...)
	Aceite sintético (glicoles...)
<b>Emulgentes</b>	Aniónicos (sulfonatos...)

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

*Tabla 2 Aditivos más comunes para taladras.*

Como se puede ver, las composiciones de las taladras tienen una gran variabilidad, que depende de la aplicación y de la empresa que la suministre. La composición exacta de uno de estos fluidos es excesivamente complicada de conseguir, debido a su complejidad y a la competitividad entre empresas, aun así, la norma DIN 51385, clasifica estos compuestos en los siguientes grupos:

- No miscibles en agua (o de base oleosa): se emplean directamente, sin preparación previa al mecanizado.
- Miscibles con agua: se suministran como concentrados que deben ser diluidos de forma previa a su uso.
- De base acuosa: se preparan añadiéndolos al agua. Una vez mezclados, los constituyentes pueden formar una solución o una emulsión.

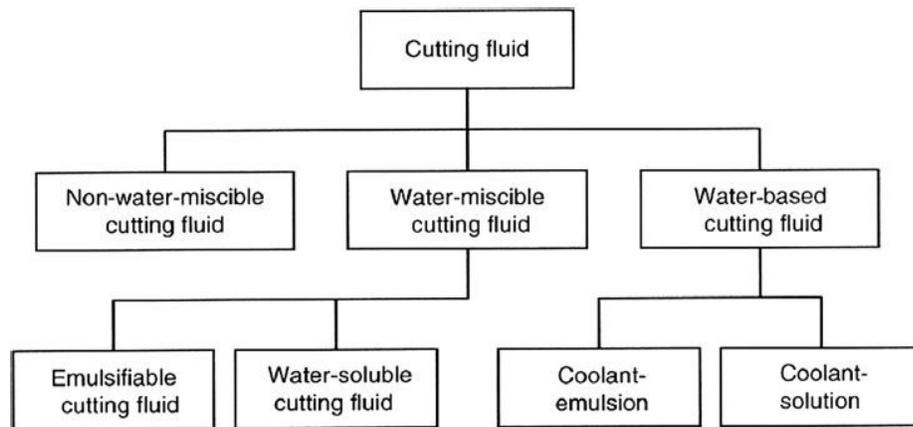


Ilustración 1. Clasificación de los fluidos de corte de acuerdo con DIN 51385

No obstante, se suelen agrupar en los siguientes 4 (Wit, 2017):

1. Aceites puros.  
Generalmente suelen ser aceites minerales con otro tipo de lubricantes y aditivos (mejorar la lubricidad, protección y corrosión). No contienen agua.
2. Aceites minerales solubles.  
Formados por aceites con emulsionantes. Se usan diluidos entre el 3 - 15%. La cantidad de emulsionantes determinara el tamaño de las gotas de aceite en la emulsión, variando desde 1 - 10  $\mu\text{m}$ .  
Son buenos refrigerantes (por su alto contenido en agua), aunque presentan problemas por corrosión y cultivos microbianos (favorecidos por las temperaturas). Son los más utilizados y los más baratos.
3. Fluidos semisintéticos.  
Están compuestos por combinaciones de aceites compuestos sintéticos y aceites minerales.  
El resultado final es una mezcla de emulsionantes naturales o sintéticos, gotas de aceite y agua.
4. Fluidos sintéticos.  
Disoluciones libres de aceite formuladas a partir de compuestos alcalinos y compuestos orgánicos.  
Se diluyen con agua hasta concentraciones entre el 3 - 10%.

### 1.3. Residuos de Taladrinas.

En las factorías, las taladrinas circulan en circuitos cerrados pasando por operaciones para alargar su vida útil, pero llegado un punto, debido a su utilización y el estrés mecánico y térmico al que se someten, sus propiedades van desapareciendo. Además, pueden aparecer componentes que no estaban en la mezcla originalmente, como aceites parásitos, partículas sólidas o bacterias. Cuando las características de la emulsión ya no cumplen con las especificaciones requeridas para la operación se dice que las taladrinas están agotadas y pasan a considerarse un residuo.

Las taladrinas se desechan, considerándose agotadas cuando (IHOBE, Sociedad Publica de Gestión Ambiental, 1999):

- La composición inicial ha sufrido alteraciones importantes que dificultan una redosificación.
- Se inicia un proceso de descomposición microbiológico, con los consiguientes olores. Aparición de microorganismos, provenientes del aire y de los trabajadores.
- La concentración de sustancias contaminantes como nitritos, nitrosaminas, gérmenes, metales pesados... es elevada y puede causar problemas de salud laboral.

La gestión de estos residuos es muy importante, ya que representan un peligro para el medio ambiente, por contener sustancias tóxicas y metales pesados y son poco degradables (los peligros para el medio ambiente se verán de forma más amplia en el apartado 11. Impacto Ambiental) y para los trabajadores pudiendo producir dermatitis, problemas respiratorios si se producen nieblas y en casos extremos cáncer de piel.

Por ello, los aceites usados, están incluidos en la *Lista Europea de Residuos*, con la consideración de residuos peligrosos (recogidos en los capítulos 12 y 13) (Orden MAM/304/2002, 8 de febrero de 2002), y su gestión está regulada en el ámbito europeo por la *Directiva 75/439/CE* recogida en la actual *Directiva 2008/75/CE* y en España por el *Real Decreto 679/2006*.

En el Real Decreto se describen los aceites usados como “Todo aquel aceite industrial que se haya vuelto inadecuado para el uso al que se le hubiera asignado inicialmente” (Real Decreto 679/2006, 3 de junio de 2006). Incluyendo en esta definición, en particular, los aceites minerales usados de los motores de combustión y de los sistemas de transmisión, los aceites minerales usados de los lubricantes, los de turbinas y de los sistemas hidráulicos, así como las mezclas y emulsiones que los contengan.

En estos documentos se recogen también las prioridades en la gestión de aceites usados por el siguiente orden: regeneración, otras formas de reciclado y valorización energética (Real Decreto 679/2006, 3 de junio de 2006). Establece también que estas operaciones de gestión de aceites usados podrán ser objeto de financiación, siempre y cuando cumplan unos requisitos.

De esta forma, si se entregan las taladrinas agotadas directamente a un gestor, la empresa productora de estos residuos tendrá que abonar el coste de las operaciones necesarias para regeneración, reciclado o valorización energética. En cambio, un correcto tratamiento por parte de la empresa puede eliminar estos costes, e incluso percibir un beneficio por ello.



## 2. Objetivos.

El objetivo de este proyecto es reemplazar y mejorar una instalación existente para el tratamiento de taladrinas agotadas en una factoría del sector de la automoción, con el objetivo de conseguir un proceso de “Vertido Cero”.

### 2.1. Descripción de la instalación a remplazar.

La instalación se divide en dos partes. La primera se encarga de concentrar el efluente de llegada, con una concentración de un 4 - 8% hasta una concentración entorno al 70% de aceite. Para ello, cuenta con tres evaporadores a vacío, que funcionan mediante termocompresión, con una capacidad de tratamiento conjunta de aproximadamente 75 m<sup>3</sup>. Dos de las unidades son dos versiones de un mismo modelo (por lo que comparten características, aunque difieren en algunos componentes) y el tercero es otra unidad distinta suministrada por otro fabricante.

La segunda parte de la instalación consta de un concentrador que lleva el concentrado de la etapa anterior hasta el 98%. Esta unidad tiene una capacidad de tratamiento diaria de 6 m<sup>3</sup>, pero el tratamiento real dista mucho de esta cantidad (casi la mitad).

Por otro lado, la instalación cuenta con dos balsas de taladrinas agotadas, con una capacidad conjunta para almacenar 2800 m<sup>3</sup>, una balsa intermedia de 60 m<sup>3</sup> para el concentrado de la primera parte del proceso, y una balsa final para el concentrado final. Existen también 2 fosas subterráneas a las que llega la taladrina agotada antes de pasar a las balsas.

Se adjunta planos de la instalación, así como un PFD en el Anexo VII de planos.

La instalación presenta los siguientes problemas:

- Ambas partes del proceso están desacopladas, ya que el concentrador no es capacitivo, tratando  $3,1 \frac{m^3}{día}$  frente a los  $5,81 \frac{m^3}{día}$  de concentrado producidos por los 3 evaporadores.
- Los evaporadores trabajan en continuo, mientras que el concentrador trabaja por cargas, por lo que es necesaria una balsa intermedia para contener el concentrado de los evaporadores hasta la siguiente carga.
- Al existir 4 máquinas, el gasto energético es mayor (debido a que hay 3 compresores y una caldera).
- La instalación tiene una edad de casi 15 años, lo que, junto con un mantenimiento insuficiente, ha hecho que las máquinas y sus componentes mecánicos estén deteriorados.
- A esto se suman las complicaciones derivadas de tener tres unidades paquete que requieren repuestos distintos para componentes mecánicos importantes como los compresores y los motores que los mueven, así como bombas centrífugas (las unidades hermanas tienen 5 cada una de distintos tamaños).
- Problemas de corrosión.

- Parte de las conducciones de fluidos externas a las máquinas tienen problemas de corrosión.
- Las 4 unidades requieren de un control manual de los parámetros a través del controlador (completamente obsoleto en una de las máquinas).

## 2.2. Capacidad de la planta.

El objetivo de este anteproyecto es diseñar una planta de tratamiento de aceites usados, que pueda reemplazar a la actual, con un proceso continuo más eficiente energéticamente.

La planta debe ser capaz de producir la cantidad de aceite valorizable suficiente para extraer un camión cisterna cada 5 días (aprox. 30 m<sup>3</sup> de aceite).

## 2.3. Especificaciones.

La planta deberá producir una corriente de agua que cumpla las especificaciones mínimas para su uso en una red industrial.

Debe generar una corriente de aceite valorizable con un porcentaje de aceite mínimo del 90%.

### 3. Bases de Diseño.

#### 3.1. Bases de diseño de proceso.

Debido a que las composiciones de las taladrinas dependen de la operación en la que se empleen, CASTROL ha proporcionado de las que suministra la más desfavorable para la evaporación. La composición de la alimentación es, por tanto:

ALIMENTACIÓN	Composicion Inicial	[m3/h]	[KMOL/H]	[KG/H]	[% WW]	[%NN]
Agua	94,00%	3.73	205,90	3.710,36	93,88%	99,34%
Aceite	3,30%	0,15	0,36	120,18	3,04%	0,17%
Acid carboxilicos con aminas	1,50%	0,07	0,67	61,18	1,55%	0,32%
Acido carbónico con 2-aminoetanol (1:2)	0,60%	0,03	0,18	33,87	0,86%	0,09%
Alcoholes (C16-C18) etoxilados	0,30%	0,01	0,04	11,61	0,29%	0,02%
2,2 metilaminodietanol	0,30%	0,01	0,13	15,02	0,38%	0,06%
<b>Total</b>	<b>1,00</b>	<b>5,23</b>	<b>207,28</b>	<b>3.952,21</b>	<b>1,00</b>	<b>1,00</b>

Tabla 3. Alimentación a proceso

Propiedades físicas de la corriente de alimentación	
P [Bara]	1,00
T [°C]	18,00
Flujo [Kg/h]	3952,21
Flujo molar [kmol/h]	207,28
Caudal [m3/h]	3,99
Densidad [Kg/m3]	990,55
MM	19,07

Tabla 4. Propiedades físicas de la corriente de alimentación.

A la salida del proceso, el efluente de agua clarificada debe ser apto para su uso industrial, y el efluente de aceite concentrado, debe contener un residuo seco del 98% en peso.

#### 3.2. Casos de diseño

Para el diseño del proceso se tendrán en cuenta tres casos: Caso normal (100%), caso de diseño, y turn-down (85%).

- 1) *Capacidad Nominal*: Condiciones normales de flujo. Las tablas de corrientes se calculan para cumplir los objetivos marcados por el cliente.
- 2) *Capacidad de Diseño*: Las tablas de corriente se calculan para una alimentación 1.15 veces mayor que la nominal. Es el punto máximo operacional en el que la planta puede operar.
- 3) *Turn-down*: Las tablas de corriente se calculan para una alimentación 0.65 veces más pequeña que la nominal. Este es el mínimo punto operacional en el que puede operar nuestra planta.

Todos los equipos se diseñan para el *design case*, aunque algunas temperaturas y presiones son las mismas para todos los casos (como las presiones de vacío y las temperaturas de ebullición).

### 3.3. Utilidades disponibles.

Fuera del proceso principal, contamos con otras corrientes, necesarias para llevarlo a cabo y mantenerlo bajo control.

La planta cuenta con las siguientes utilidades:

- *Agua de refrigeración:* CWS = 20 °C; 5 bara
- *Aire comprimido:* IA = amb; 15 bara (punto de rocío -38 °C)
- *Humos de combustión:* T = 360 °C; P = 5bara

### 3.4. Diseño del proceso.

La planta trabajara 8424 horas al año, con un tratamiento de 90 m3/día.

### 3.5. Códigos y legislación aplicable.

Los códigos aplicables para el diseño de equipos son los siguientes:

- American Society of mechanical Engineers (ASME) Sección VIII.
- American Petroleum Institute (API)
- American National Standard Institute (ANSI)
- Environmental Protection Agency (EPA)

Legislación aplicable:

- Real Decreto 679/2006, de 2 de junio (A nivel nacional).
- Orden MAM/304/2020, del 8 de febrero (A nivel nacional).
- European Standard DIN 51385 (A nivel europeo).
- Directiva 2008/98/CE sobre residuos (A nivel europeo).

Sistema de unidades – Sistema Internacional:

MAGNITUD	UNIDADES	ABREV.
Longitud	metros	m
Masa	kilogramos	kg
Tiempo	segundos; horas	s; h
Frecuencia	hertzios	Hz
Presión, absoluta	bar	bara
Presión gauge	bar	barg
Transferencia de calor		Mm-kcal/h
Energía	kilovatio	kW
Potencia electrica	watio	W
Voltaje	voltios	V
Temperatura	grados centígrados	°C
Temperatura absoluta	Kelvin	K

<b>Peso Molecular</b>		kg/kmol
<b>Corriente Eléctrica</b>	Amperios	A
<b>Resistencia Eléctrica</b>	Ohmios	$\Omega$
<b>Volumen</b>	Metros cúbicos	m <sup>3</sup>
<b>Condiciones Estándar</b>		1 bara; 298,15 K

Tabla 5. Referencia de unidades SI

### 3.6. Datos climatológicos.

La planta estará situada en Valladolid, Castilla y León.

El clima de Valladolid es de tipo continental y se caracteriza por veranos cálidos e inviernos fríos. El clima está clasificado por el sistema de Köppen como Csa.

Presenta una temperatura media anual de 12,5 °C y unas precipitaciones acumulada anual de 400 mm.

En los siguientes gráficos se pueden ver las temperaturas a lo largo del año pasado y las precipitaciones de la estación más lluviosa para Valladolid (AEMET, 2020):

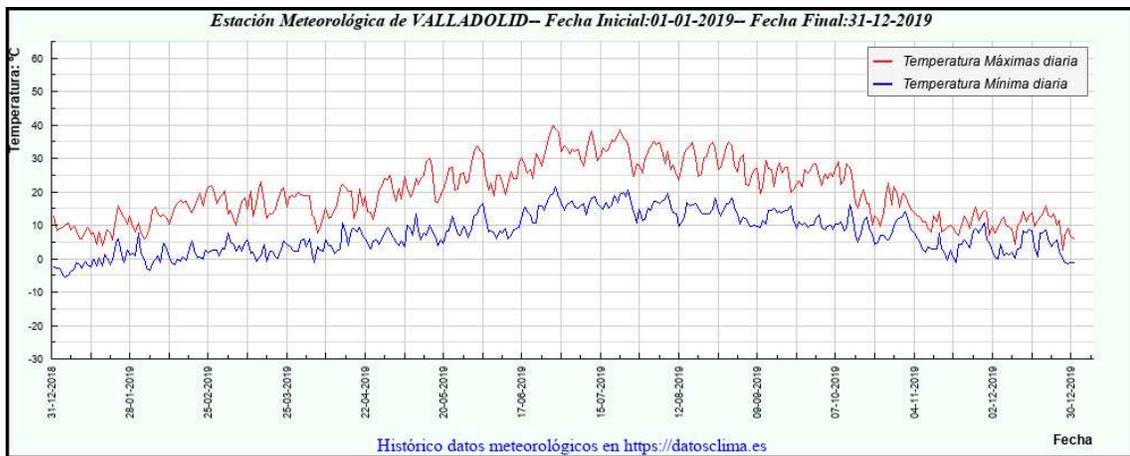


Ilustración 2. Gráfico de temperaturas Valladolid 2019

CARACTERÍSTICA / VALOR	TEMPERATURA [ C]
Temperatura Máxima más alta Registrada	39,8
Temperatura Máxima más baja Registrada	2,7
Temperatura Mínima más alta Registrada	21,5
Temperatura Mínima más baja Registrada	-5,50
Mayor diferencia de temperaturas en un mismo día (Tmax-Tmin)	22,2
Mayor ascenso de temperaturas máximas en 24 h	7,6
Mayor ascenso de temperaturas mínimas en 24 h	7,8
Mayor descenso de temperaturas máximas en 24 h	10,3
Mayor descenso de temperaturas mínimas en 24 h	6,9

Tabla 6. Tabla de datos de temperatura 2019

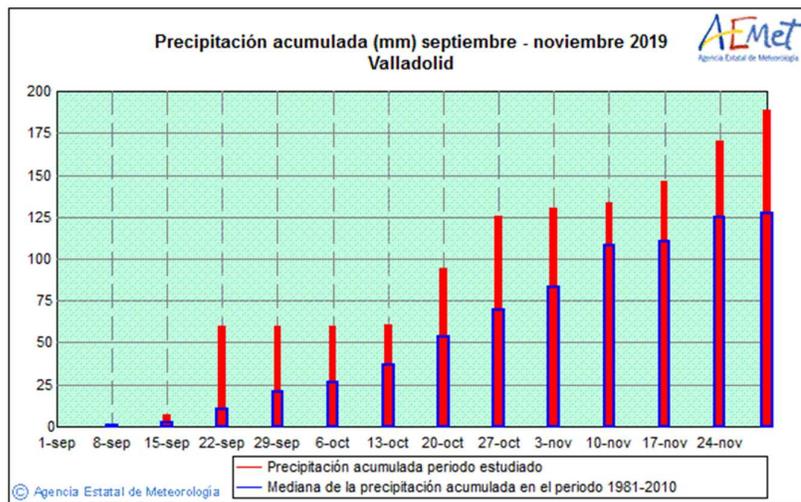


Ilustración 3. Gráfico de precipitaciones Otoño 2019

#### 4. Localización de la planta.

La planta va a localizarse en la provincia de Valladolid, entre Valladolid capital y Laguna de Duero, en la Factoría de Motores de Renault.

Esta factoría produce  $65 \frac{m^3}{día}$  de taladrinas agotadas, por lo que la necesidad de una planta de tratamiento está justificada.

Dentro de la factoría se dispondría del área que ocupa la actual terminal de vertidos, con un área aproximada de 209 m<sup>2</sup> y un perímetro de 63 m para el proceso principal, más el área ocupada por las balsas para almacenamiento.



Ilustración 4. Laguna de Duero - Renault - Valladolid

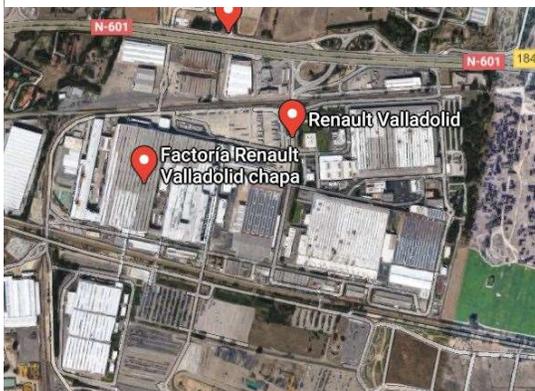


Ilustración 6. Factoría Motores Renault



Ilustración 5. Actual Terminal de Vertidos



## 5. Alternativas y selección del proceso.

Actualmente, existen varios tipos de tratamientos para las taladrinas agotadas, los cuales se clasifican en *Destructivos* y *No Destructivos*. No trataremos los métodos destructivos, ya que se necesitan permisos especiales como gestor autorizado y se genera cierta contaminación (como en el método de incineración en el cual se producen emisiones de gases de efecto invernadero, además de otros vapores tóxicos que habría que eliminar).

En cuanto a los métodos no destructivos, distinguimos dos grupos:

- Métodos químicos:
  - a) Roturas ácidas.
  - b) Roturas neutras
- Métodos físicos:
  - a) Ultrafiltración.
  - b) Ósmosis inversa.
  - c) Evaporación.
  - d) Electro-floculación.

Los métodos no destructivos empleados para el tratamiento de taladrinas agotadas, conllevan la separación de la fase acuosa de la oleosa, para posteriormente tratarlas por separado.

La elección del método de tratamiento adecuado no es algo sencillo, ya que las corrientes pueden variar su composición a diario, por lo que en función del porcentaje que varíen y de la frecuencia con la que lo hagan será más fácil o más complicado (e incluso imposible) tratarlos con ciertos métodos. Por lo que dependiendo del control que haya sobre las corrientes, se podrán elegir métodos con unas características más concretas o habrá que optar por métodos que acepten mejor las variaciones.

Además, se debe tener en cuenta la posibilidad de que las fases puedan decantar si se deja el suficiente tiempo.

Es importante destacar, que, hasta el método de tratamiento más caro, representa un ahorro considerable frente al vertido directo.

### 5.1. Rotura química con sales inorgánicas y polímeros orgánicos.

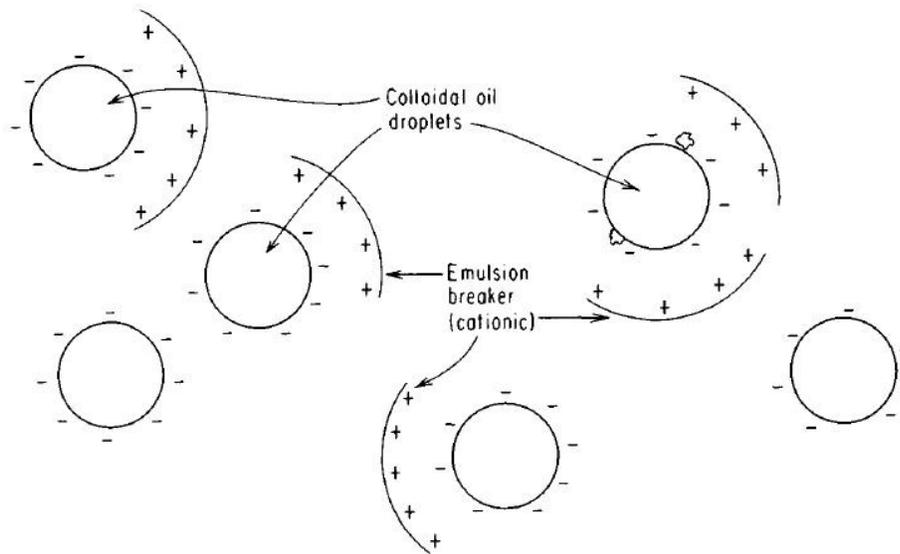
Los procesos de rotura química se basan en romper o separar las fases de la emulsión, para ello se deben desestabilizar las cargas superficiales de la interfase formada entre el aceite y el agua, para permitir que las gotas de aceite se unan hasta tener un tamaño suficiente como para flotar sobre el agua.

Para esto, se requiere de un coagulante catiónico cargado positivamente para separar las partículas con carga negativa inducida por el emulsionante, que mantiene estable la emulsión.

La secuencia típica de una rotura química es:

- I. Añadir ácido para reducir el pH.
- II. Añadir el coagulante para desestabilizar la emulsión.
- III. Añadir base para subir el pH.

El ácido convierte el ion carboxilo de los compuestos tensoactivos en ácidos carboxílicos que permiten a las gotas unirse (Kemmer, 1998).



*Ilustración 7. Acción de los coagulantes catiónicos neutralizando las cargas superficiales de las gotas de aceite en una emulsión de aceite en agua.*

Los coagulantes catiónicos inorgánicos más empleados son sales de aluminio ( $\text{Al}^{+3}$ ), calcio ( $\text{Ca}^{+3}$ ) y hierro ( $\text{Fe}^{+3}$ ), como sulfato de aluminio ( $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ ), cloruro de calcio ( $\text{CaCl}_2$ ), cloruro de hierro ( $\text{FeCl}_3$ ) o sulfato de hierro ( $\text{FeSO}_4$ ) (Kemmer, 1998).

Finalmente, las bases se añaden para aumentar el pH y hacer que precipiten los metales solubles como sus hidróxidos. Se suele emplear hidróxido de sodio ( $\text{NaOH}$ ) con este fin (Kemmer, 1998). Estos precipitados pueden quedar atrapados en la interfase, dando lugar a *aguas negras*.

Otros coagulantes empleados para hacer roturas químicas son los polímeros orgánicos catiónicos (poliaminas, poliacrilatos y copolímeros derivados de estos (Kemmer, 1998)). Son sustitutos para los cationes inorgánicos mencionados anteriormente. Su uso está aumentando, debido a que las dosis necesarias son menores y reducen la precipitación de sólidos.

Las roturas ácidas, o mediante compuestos inorgánicos, son más efectivos en entornos moderadamente ácidos, mientras que los polímeros catiónicos funcionan mejor en efluentes neutros o ligeramente alcalinos (Burke, 2006).

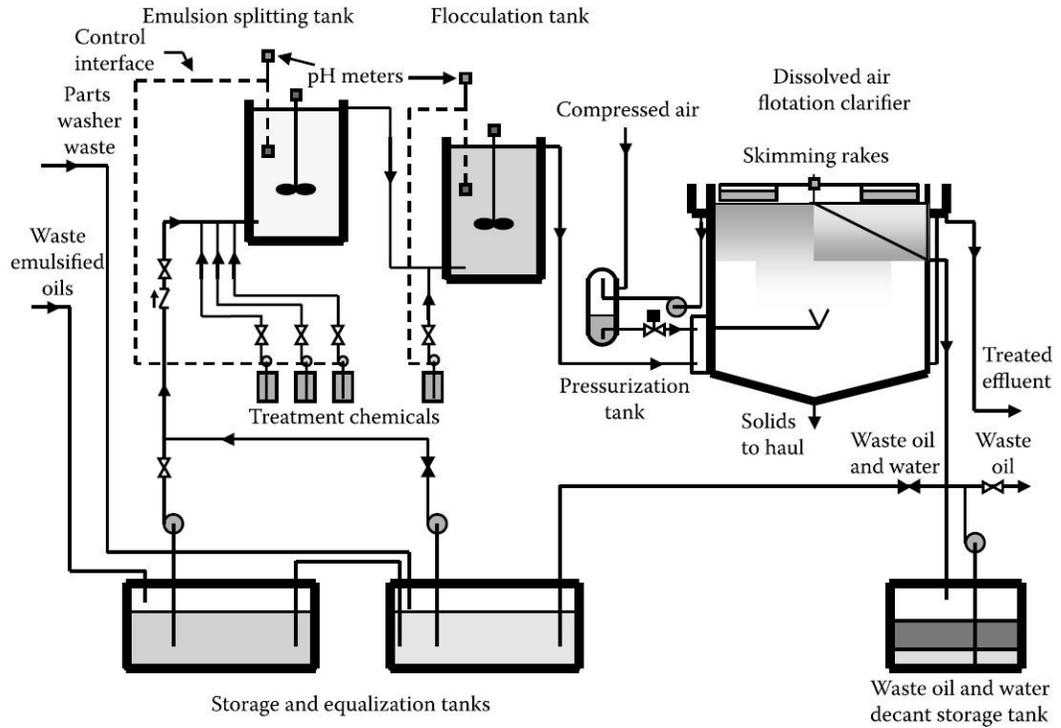


Ilustración 8. Tratamiento de rotura química - Método Continuo (Burke, 2006)

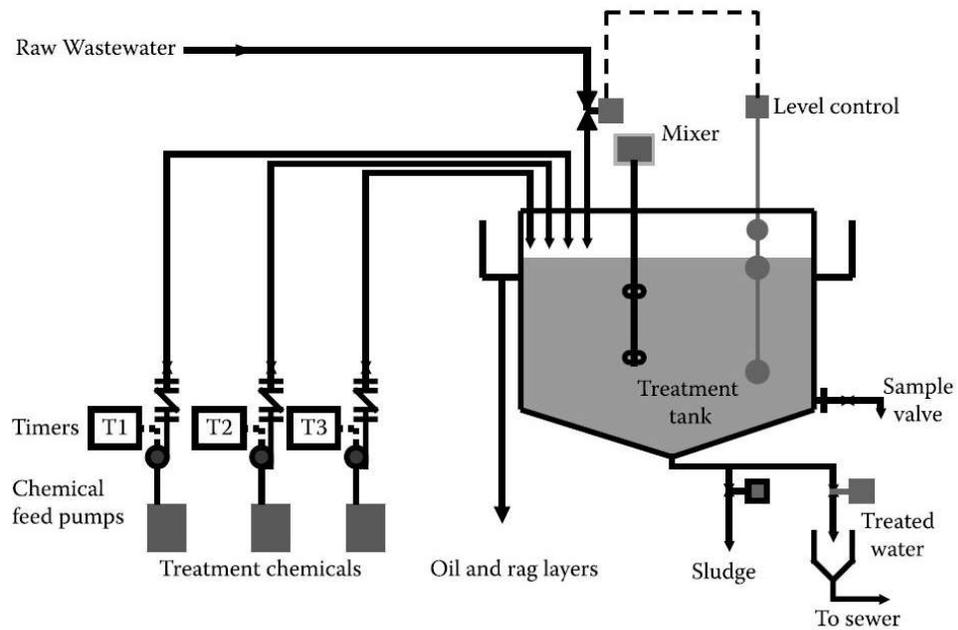


Ilustración 9. Tratamiento de rotura química - Método Batch (Burke, 2006)

**Ventajas:**

- La complejidad tecnológica es baja, así como los costes de energía y mantenimiento.
- Permite tratar grandes cantidades de residuo a la vez.

**Inconvenientes:**

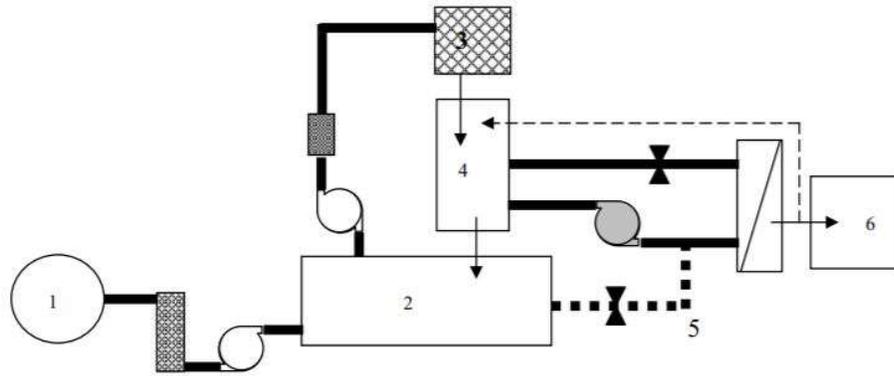
- Produce unos lodos todavía más peligrosos y difíciles de tratar que el residuo inicial.
- Existe una ventana de pH y de la cantidad de coagulantes que se pueden añadir: si la dosis se queda corta, puede no desestabilizar las cargas y no romper la emulsión, pero si la dosis es excesiva, puede re-estabilizar la emulsión.
- Se pueden producir efluentes de baja calidad sin previo aviso por cambios en la composición o concentración de la corriente a tratar, lo que estropearía el tratamiento realizado.
- Debido a los cambios de concentración, se deben preparar las cantidades necesarias para cada carga a tratar, por lo que el técnico debe estar altamente cualificado para preparar las dosis y administrarlas a diario.
- Solo se podrá trabajar en continuo si las composiciones están bien definidas, y las variaciones son pequeñas. No obstante, requiere un gran control.

**5.2. Ultrafiltración.**

Consiste en la eliminación de los aceites emulsionados y otros compuestos dispersos en las taladrinas, en un proceso de filtración a presión a través de una membrana, con unos rangos de poro típicos entre 0,02 y 0,07  $\mu\text{m}$  y unas presiones que varían entre 2 y 5 barg. Además, con ciertas modificaciones se pueden emplear para tratar fluidos alcalinos y ácidos empleados en los baños de las taladrinas.

Pueden ser acoplados a reactores biológicos que pueden realizar el tratamiento terciario de los efluentes clarificados.

Este método es capaz de llevar corrientes con concentraciones de aceite entorno al 1%, hasta concentraciones del 30 - 50%. Cuando se alcanzan altas concentraciones, el flujo disminuye mucho y aumenta la presión.



(1) Storage tank (2) Main tank (3) Coalescing tank (4) Process tank (5) By pass (6) Permeate tank

Ilustración 10. Esquema básico de un sistema de ultrafiltración (Kemmer, 1998)

Se pueden encontrar dos tipos de sistemas de ultrafiltración (Ures Rodríguez & et al., 2015):

- UF de canal ancho: Emplea diámetros entre 0,63 - 2,5 cm

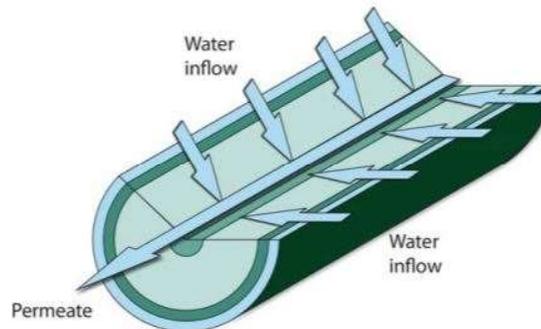


Ilustración 11 Membrana de canal ancho (modelo de CITME, 2006)

- UF de canal estrecho: la membrana se dispone como una hoja plegada en forma de espiral o como cartuchos de canal con diámetros aproximados de 0,1 cm.



*Ilustración 12 Membrana enrollada en espiral (modelo de CITME, 2006)*

#### **Ventajas:**

- Es un método relativamente barato.
- Buen rendimiento del permeado dependiendo del flujo cruzado a través de la membrana y la elección de esta.

#### **Inconvenientes:**

- El agua resultante del permeado tiene altas concentraciones de compuestos orgánicos.
- Permite el paso de ciertos metales disueltos.
- Puede llegar a obstruirse de forma irreversible si hay aceites no emulsionados.

### **5.3. Evaporación.**

La tecnología de evaporación es posiblemente la más estudiada y conocida de todas las que se presentan. En este caso la emulsión se separa empleando los diferentes puntos de ebullición del agua y del aceite. Puede ser utilizada para tratar eficazmente una amplia variedad de aguas residuales provenientes de diversos procesos industriales, concentrando los compuestos contaminantes y permitiendo extraer un destilado de gran calidad.

Este método requiere el aporte de grandes cantidades de energía, ya que a medida que se concentra hay que aportar más calor al fluido de proceso.

Esto puede reducirse empleando evaporadores a vacío, los cuales recuperan el calor de los vapores generados mediante un condensador, recuperando hasta el 93% del calor empleado (Burke, 2006), evitando expulsarlos a la atmósfera y produciendo efluentes líquidos. Hay dos principios mediante los cuales se puede llevar este proceso a cabo: evaporación a vacío por bomba de calor y evaporación a vacío por termocompresión.

### Evaporación por bomba de calor.

Los equipos basados en el principio de evaporación al vacío por bomba de calor llevan a cabo el proceso calentando el efluente hasta su punto de ebullición, aprovechándose de que, en condiciones de vacío, este puede llegar hasta los 40°C. Cuando el líquido comienza a hervir, el vapor es extraído de la caldera, y a su vez se alimenta con alimentación fresca en continuo.

La alimentación se calienta mediante una bomba de calor, para mantener el proceso en un régimen de operación continuo.

Este sistema de calefacción se asemeja a un ciclo frigorífico, de forma que el vapor extraído de la caldera se comprime empleando un compresor, sobrecalentándolo y enviándolo a un intercambiador de calor, donde se encuentra con la alimentación previo a su entrada a la caldera. Finalmente, el vapor empleado se condensa y descomprime en una válvula de expansión.

### Evaporación por termocompresión.

El principio de separación es el mismo que en los evaporadores por bomba de calor, pero el método para hacer el vacío y obtener el vapor difiere. Estos equipos generan la presión de vacío mediante soplantes o compresores de tornillo, generando un vapor sobrecalentado por la acción de estos.

Este vapor comprimido y sobrecalentado, se emplea en calentar la alimentación que se pretende evaporar, mediante un cambiador de calor, condensando y dando como resultado una corriente de agua destilada. Los rangos de temperatura en los que se trabaja con este principio van desde los 60°C hasta los 90°C.

La alimentación fresca, se puede cruzar con el agua destilada en un precalentador, para aprovechar el calor que pueda quedarle.

### **Ventajas:**

- Gran calidad de efluentes.
- Puede tratar efluentes con concentraciones y composiciones diversas.
- Procesos continuos y automáticos, que no necesitan personal especialmente cualificado para su control.
- Pueden tratar grandes volúmenes.

### **Inconvenientes:**

- Alto consumo energético.
- Mantenimiento más complejo debido a la gran cantidad de elementos mecánicos.

#### 5.4. Electro-floculación.

El proceso de electrocoagulación es muy similar a un tratamiento químico típico de coagulación, pero empleando energía eléctrica. Ambos procesos tienen por objetivo la desestabilización de las cargas superficiales de los contaminantes contenidos en un agua y se diferencian en el modo de adición del reactivo: en coagulación convencional el reactivo se añade como sal y en electrocoagulación se genera a partir de un metal.

Estos metales están contenidos en el electrodo de sacrificio. Los iones permiten que los contaminantes se aglomeren de la misma forma que si se adicionara un catión metálico. Este método tiene una gran ventaja frente a la rotura química convencional, y es que no se añaden compuestos inorgánicos que posteriormente deban tratarse, reduciendo la cantidad de lodos a la mitad o incluso a una tercera parte.

El exceso de electrones es generado por la diferencia de potencial eléctrico aplicado entre dos o más electrodos. Produce la ionización del ánodo que opera como fuente de iones para llevar a cabo la floculación de los contaminantes, provocando la desestabilización de la emulsión y con ello la separación del sistema en fases.

Además, en este proceso se produce la incineración electroquímica de los contaminantes orgánicos en  $\text{CO}_2$  y  $\text{H}_2\text{O}$ , principalmente, reduciendo la DQO y la DBOs del agua clarificada, además de la eliminación de metales pesados por los procesos de oxidación reducción, eliminación de sólidos en suspensión y coloides, eliminación de dureza del agua mediante precipitación de cationes calcio y magnesio, y desinfección de bacterias, virus y parásitos (Suárez López & al., 2015).

##### **Ventajas:**

- Reducción de lodos en comparación con el método químico.
- Efluentes de buena calidad.
- Puede aplicarse a efluentes con concentraciones y composiciones variables.

##### **Inconvenientes:**

- Tecnología todavía en desarrollo.
- Alto consumo energético.

#### 5.5. Comparación y selección del proceso.

A continuación, se expone una tabla para evaluar las tecnologías presentadas

EVALUACIÓN DE LAS PRINCIPALES TECNOLOGÍAS DE TRATAMIENTO DE TALADRINAS

Tecnología de tratamiento	Costes de inversión	Costes de explotación					Tratamiento de efluentes	Simplicidad pre-tratamiento	Simplicidad post-tratamiento	Valorización de lodos	Versatilidad	Desarrollo tecnológico
		Aditivos	Energía	Mantenimiento	Tratamiento residuos							
Rotura ácida-salina	Favorable	Medio	Favorable	Favorable	Desfavorable	Desfavorable	Favorable	Desfavorable	Desfavorable	Medio	Favorable	
Rotura	Favorable	Desfavorable	Favorable	Favorable	Favorable	Medio	Medio	Medio	Favorable	Medio	Desfavorable	
Ultrafiltración	Medio	-	Medio	Medio	Favorable	Medio	Medio	Medio	Favorable	Medio	Favorable	
Evaporación	Desfavorable	-	Desfavorable	Medio	Favorable	Favorable	Medio	Medio	Medio	Favorable	Favorable	
Electrocoagulación	Medio	-	Medio	Medio	Favorable	Medio	Medio	Medio	Favorable	Medio	Desfavorable	

Tabla 7. Comparación de las tecnologías disponibles



A la hora de escoger la tecnología para el proceso debemos tener en cuenta el contexto y las condiciones del proceso. En este caso, tenemos una planta que trabaja con 8 tipos de aceites de corte distintos, suministrados por dos empresas distintas, por lo que las composiciones van a sufrir variaciones.

Es cierto que con la capacidad de almacenamiento que posee la planta, estas balsas puede funcionar como un *buffer*, amortiguando los cambios de composición y concentración. No obstante, debido al tiempo que lleva la factoría trabajando y el estado de las lavadoras de taladrinas, se producen filtraciones y purgas con bastante frecuencia y en cantidades considerables, por lo que si llegan a notarse estas variaciones.

Por esto, la versatilidad de la planta es uno de los aspectos más a tener en cuenta.

Por otro lado, esta instalación se encuadra en un proyecto de “Vertido Cero”, con el objetivo de conseguir un circuito cerrado para el agua, por lo que la calidad de los efluentes es importante, sobre todo la de la corriente de agua clarificada.

Teniendo estos aspectos en cuenta, se descartan los métodos químicos, que generan unos lodos más peligrosos que el residuo original (aunque en menores cantidades), y hay que eliminar los aditivos empleados para romper la emulsión.

En cuanto a los métodos físicos, la valorización de los lodos es mejor en los métodos de ultrafiltración y de electrocoagulación frente a la evaporación, también están por delante en cuanto a consumo energético, pero la evaporación es un método más versátil, con mejores resultados en el tratamiento de efluentes y de residuos, además de que es una tecnología muy estudiada y desarrollada.

Por tanto, la opción escogida es el método de evaporación. Los evaporadores por termocompresión permiten tratar una corriente residual acuosa de forma eficiente, sencilla y sin utilización de reactivos. Son altamente eficaces incluso cuando las tecnologías convencionales no son viables. Mediante un evaporador por termocompresión se puede transformar un efluente residual en dos corrientes, una de concentrado (incluso llegando cerca de la sequedad) y otra de agua de elevada calidad.

## 6. Descripción del Proceso.

### 6.1. Diagrama de Bloques.

El diagrama de bloques de la unidad U-100, A2-BD-101, se encuentra en el Anexo de Planos de la memoria.

### 6.2. Descripción General.

El objetivo del proceso es obtener un residuo concentrado, dentro de los límites marcados por el contrato con el Sistema Integrado de Gestión de Aceites Usados (SIGAUS) para su retirada gratuita (concentración de residuo seco mayor del 90% en peso), y la recuperación de una corriente de destilado que se ha empleado en diluir las taladrinas puras, y la cual se recupera para la red de agua industrial creando un circuito de cerrado con vertido cero.

La alimentación del proceso proviene de las balsas de llegada de taladrina dispuestas para este fin. De ahí, se lleva el residuo a una balsa pulmón, que cuenta con una serie de filtros, para retener partículas sólidas que hayan podido llegar por el arrastre de las líneas, como virutas metálicas, plásticos u otro tipo de deshecho.

Una vez eliminados los residuos sólidos que pueden dañar el proceso, la corriente de alimentación pasa al primer intercambiador de calor, en el que esta corriente se calienta hasta obtener la fracción de vapor necesaria en esta primera etapa.

Una vez que la corriente ha recibido la energía suficiente para evaporarse, se pasa a un depósito o caldera en el cual se separa el vapor destilado y una corriente de concentrado, que pasara al siguiente intercambiador de calor. La corriente de vapor es recogida por una soplante que comprime la corriente sobrecalentándola para poder emplearla en el intercambiador de calor como corriente caliente, condensándola y dando una corriente de agua destilada.

La corriente de concentrado pasa a un segundo intercambiador de calor, más pequeño, en el cual recibe el calor necesario para evaporar la mayor parte del agua restante. Una vez sale del cambiador, pasa a un depósito para separar las corrientes de vapor y concentrado final. La corriente de vapor se emplea de forma análoga a la de la primera etapa de evaporación del proceso, dando como resultado una nueva corriente de agua destilada.

La corriente de concentrado que sale del segundo depósito constituye el producto final del proceso, que se lleva a una de las balsas para su posterior extracción mediante camiones cisterna.

Las corrientes de destilado obtenidas en el proceso son de alta calidad, por lo que se pueden reintroducir al circuito de agua industrial, para emplear en distintas funciones (no así para su consumo).

### 6.3. Arranque del Proceso.

Para el arranque del proceso se contará con una serie de resistencias eléctricas, situadas en el depósito D-101, que proporcionaran la energía necesaria a la alimentación para alcanzar las condiciones de evaporación.

La alimentación se recirculará desde el depósito D-101, de vuelta a la entrada del intercambiador E-101 y desde este de vuelta al depósito D-101. Cuando se consigan las condiciones de operación necesarias para comenzar a evaporar, se arrancará el compresor C-101.

Se asume un tiempo de calentamiento de entre 10 – 12 horas, puesto que la operación de parada y arranque del proceso no debería ser algo habitual.

La segunda etapa de evaporación necesita el concentrado de la primera etapa, por lo que se emplea una línea de vapor de baja presión hasta que se dan las condiciones en las que puede arrancar el compresor C-102 y el intercambiador de calor E-102 pueda trabajar de forma normal.

### 6.4. Diagrama de Flujo.

El diagrama de bloques de la unidad U-100, A2-PFD-101, se encuentra en el Anexo Planos.

## 6.5. Balances de Materia.

Los casos de los balances de materia del 115%, 100% y 85% se incluirán en el Anexo I Balances de Materia.

### 1. Caso 100%

El caso de operación 100% se corresponde con el punto de funcionamiento estándar de la planta, en el cual, el tiempo de retirada de un camión cisterna de aceite reutilizado ( $30 \text{ m}^3$ ) es de 4 días y medio.

La producción de aceite de reutilizable es de  $0,28 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$ , lo que hace que el tiempo de retirada de un camión cisterna de aceite sea de 4 días y medio.

Se consigue un tratamiento de  $96,97 \frac{\text{m}^3}{\text{día}}$  de vertido.

### 2. Caso 115%

El caso de operación 115% se corresponde con el punto máximo de funcionamiento de la planta y se corresponde con el caso para el cual se diseñan los equipos y el proceso.

En este caso, la producción de aceite reutilizable es de  $0,31 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$ , que se traduce en un tiempo de retirada de un camión cisterna de aceite reutilizable cada 4 días.

Se consigue un tratamiento de  $110,63 \frac{\text{m}^3}{\text{día}}$  de vertido.

### 3. Caso 85%

El caso de operación 85% se corresponde con el punto mínimo de operación de la planta.

En este caso, la producción de aceite reutilizable es de  $0,24 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$ , que se traduce en un tiempo de retirada de un camión cisterna de aceite reutilizable en algo más de 5 días.

Se consigue un tratamiento de  $82,43 \frac{\text{m}^3}{\text{día}}$  de vertido.

## 6.6. Descripción Detallada.

Para dimensionar el proceso y establecer las condiciones de operación, se toma como punto de partida la intención del cliente de extraer un camión cisterna, con capacidad para 30 m<sup>3</sup> de volumen, cada 4 días y medio.

La concentración de taladrina pura en las balsas de llegada se puede suponer constante, manteniéndose entre un 6% y un 7% aproximadamente. La planta en condiciones normales trata  $96,97 \frac{m^3}{día}$ , produciendo una corriente de concentrado de  $6,71 \frac{m^3}{día}$ .

Se emplean las balsas de llegada existentes, para almacenar el residuo, de donde pasan a una balsa pulmón, equipada con un sistema de filtración de 0,5 mm, para evitar que residuos sólidos de procedencia externa, como virutas metálicas arrastradas en los procesos de corte o plásticos, puedan acceder al proceso obstruyendo las líneas y dañando los equipos de proceso.

Una vez eliminados los residuos sólidos, la alimentación entra en la etapa de alimentación impulsada por la bomba P-101 A/B hacia el intercambiador de calor E-101, a una presión de 1,3 bara, suficiente para impulsar el líquido de proceso a través del intercambiador y hasta el depósito D-101. La entrada de alimentación está controlada por la válvula de flujo FT-101, que recibe la señal de un medidor de flujo, manteniendo un caudal de alimentación al intercambiador (y al proceso) de  $4,04 \frac{m^3}{h}$ .

La alimentación pasa a través del intercambiador de calor E-101, pasando de 18°C a 109°C, con una fracción de vapor del 0,90 (en masa). A la salida del intercambiador, pasa por una válvula isoentálpica, VP-101 que reduce la presión hasta 1 bara a la entrada del depósito D-101, aumentando la fracción de vapor a 0,91.

En la unidad D-101 se separa una corriente de vapor de  $3579,63 \frac{kg}{h}$  ( $6194,21 \frac{m^3}{h}$  a 1 bara de presión), que se lleva a una soplante que la comprime hasta 1,6 bara, y se sobrecalienta hasta los 165°C de temperatura. Esta corriente sobrecalentada se emplea como corriente caliente en el intercambiador E-101, cediendo 2626 kW a la corriente fría de alimentación, condensando por completo y saliendo de la unidad a una temperatura de 38°C.

La corriente de concentrado que se separa como líquido en la unidad D-101, tiene un valor de  $372,57 \frac{kg}{h}$ , que equivalen a  $0,4 \frac{m^3}{h}$ . Esta corriente se impulsa a través de la bomba P-102 A/B hasta el intercambiador de calor E-102. Esta bomba está controlada por la válvula de nivel LV-101, que recibe la señal de nivel del depósito D-101.

En el intercambiador de calor E-102 pasa de 101,8 a 124,4°C, haciendo que la fracción de vapor en masa pase de 0 a 0,83. Antes de entrar en el depósito D-102, la corriente pasa por una válvula isoentálpica que reduce su presión a 1 bara, lo que provoca el aumento de la fracción de vapor en masa a 0,84 y una bajada en su temperatura a 118,5°C.

En estas condiciones, se separa una corriente de vapor de  $117,74 \frac{kg}{h}$ , con un volumen de  $212,14 \frac{m^3}{h}$ . Esta corriente como en la primera etapa de evaporación se devuelve al intercambiador de calor E-102 como corriente caliente, que condensa por completo y sale a una temperatura de  $119^{\circ}C$  y una presión de  $1,8$  bara.

De la unidad D-102 se extrae un flujo de  $0,28 \frac{m^3}{h}$  ( $254,84 \frac{kg}{h}$ ) de concentrado final, que se impulsa hasta la balsa final, de la cual se extraen los camiones cisterna.

## 6.7. Integración Energética.

Para la integración energética, se ha empleado la herramienta HIX (Mato Chain, 2020), que se basa en el análisis de Pinch. Se han introducido las corrientes calientes del proceso junto con las corrientes frías, para estudiar una posible integración, que redujera las necesidades de calentamiento del proceso.

En el proceso hay dos corrientes frías que necesitan ser calentadas, son la corriente de alimentación del proceso y la corriente de concentrado proveniente de la primera etapa de evaporación. Se dispone también de varias corrientes calientes que pueden ser enfriadas. Estas corrientes son la corriente 14 de vapor, generado en la primera etapa de evaporación y la corriente 18, generada en la segunda etapa de evaporación. Por tanto, la integración se realiza con las siguientes corrientes:

Hot Stream	Ts	Tt	Duty	Description
<b>14</b>	101,79	28,00	-2968,3	# Destillate vapor 1
<b>18</b>	117	117	-86.04	# Destillate vapor 2
Cold Streams	Ts	Tt	Duty	Description
<b>3</b>	18,00	101,8	3017,8	# Feed inlet
<b>8</b>	101,8	121,2	93,65	#Concentrate 1

Tabla 8. Datos de corrientes HIX

El estudio de integración energética se encuentra en el ANEXO II Integración Energética.

## 7. Equipo.

### 7.1. Hojas de Especificación.

Las hojas de equipo pueden verse en el Anexo III, Apartado 1, Hojas de Especificación.

### 7.2. Diseño Detallado de equipos.

El diseño detallado de equipos puede verse en el Anexo III, Apartado 2, Diseño Detallado de Equipos.



## 8. Instrumentación y Control.

### 8.1. Estrategia de control.

En este apartado, se va a dividir el proceso en dos partes para explicar la estrategia de control.

El objetivo de control del proceso es que pueda operar de una forma autónoma, pudiendo contrarrestar ciertas alteraciones en las variables de proceso.

Los puntos más críticos de control son los que están relacionados con las variables de proceso de los intercambiadores de calor y de los compresores, es decir temperatura y presión.

Hay lazos de control en cascada para el control de las temperaturas de los intercambiadores de calor, que se controlaran mediante una válvula a la salida de la corriente caliente, que modificara el tiempo de residencia de esta en el intercambiador.

Para el control de los compresores se han implementado lazos de control a partir de las presiones de las líneas de entrada y salida para mantener un diferencial de presión constante y controlar la presión de impulsión, la cual está estrechamente relacionada con el funcionamiento de los intercambiadores de calor.

### 8.2. Diagramas de Instrumentación y Control (P&ID).

El diagrama de bloques de la unidad U-101, A2-P&ID-101-1 y A2-P&ID-101-2, se encuentra en el Anexo de Planos.

### 8.3. Lista de Lazos de Control e instrumentos

La lista de lazos de control se puede ver en el Anexo IV Lista de Lazos de Control.

## 8.4. Lazos Críticos.

Para este proceso, los lazos de control críticos son los que controlan los parámetros de operación de las dos etapas de alimentación, y el flujo de concentrado entre ambas.

### **1. Control de Temperatura intercambiador de calor E-101.**

La temperatura en el intercambiador de calor está controlada por la válvula TV-101, que está controlada por el controlador TIC-101, el cual recibe la señal de temperatura de la corriente de entrada del cambiador del transmisor TT-101.

Además, para poder amortiguar las posibles perturbaciones de la temperatura de la corriente fría a su entrada al cambiador, se ha implementado un control feed forward, en el cual el transmisor de temperatura TT-101 envía una señal al controlador TIC-101, que calcula el rango de apertura de la válvula TV-101.

El control de temperatura en el cambiador E-102 es análogo a este.

### **2. Control de la presión de impulsión del compresor.**

Para controlar la potencia entregada por el motor al compresor C-101, se cuenta con dos transmisores de presión, en la aspiración del compresor (PT-102) y en la impulsión (PT-103), que envían una señal de presión a un sumador, que genera un valor diferencial de presión, que se transmite al controlador PIC-102.

Este lazo permite controlar la presión de la corriente de vapor sobrecalentado que sale del compresor, así como protegerlo, ya que el controlador PIC-102 cuenta con dos alarmas para un valor máximo y mínimo, que, de ser alcanzados, harían parar el compresor.

El control de la presión de la corriente de impulsión del compresor E-102 es análogo a este.

### **3. Control de descarga de concentrado de la primera etapa de evaporación.**

La descarga de concentrado del primer depósito flash D-101, está controlado por la válvula de nivel LV-101, que regula el caudal de la bomba P-102 A/B.

Esta válvula esta pilotada por el controlador LIC-101, el cual recibe señal del transmisor LT-101, que mide el nivel de trabajo en la caldera. Además, se ha implementado un control en cascada, de forma que este controlador recibe también la señal del transmisor DT-101, que mide el valor de la densidad del líquido de proceso dentro del depósito, controlando que el proceso cumpla con los parámetros marcados.

El control de la descarga de concentrado de la segunda etapa de alimentación es análogo a este.

#### **4. Control de presión en la caldera.**

Para controlar la presión en la caldera, la corriente de salida del cambiador E-101 pasa por una válvula de caída de presión isoentálpica (VP-101), que recibe la señal del transmisor de presión PT-101, que pasa por el controlador PIC-101, que calcula el rango de apertura de la válvula para que a la salida de esta la presión sea de 1 bara.

La presión dentro de la caldera también está controlada por el transmisor de presión PT-102 que alimenta el lazo de control de la soplante C-101, regulando el diferencial de presión.

## 9. Seguridad y Salud Laboral.

El análisis HAZOP puede verse en el Anexo V Análisis HAZOP.



## 10. Impacto Ambiental.

Las hojas de seguridad de los productos empleados se adjuntan en el Anexo VI Fichas de seguridad.

### 10.1. Materias Primas.

La materia prima de este proceso es el aceite de corte (o taladrina) agotado, el cual está considerado como un residuo peligroso e incluido por la UE en la *Lista Europea de Residuos (LER)*, por lo que no puede verterse al medio ambiente sin su adecuado tratamiento y su gestión está estrictamente regulada tanto en el ámbito nacional, como en el ámbito europeo.

El líquido que se trata en este proceso contiene los siguientes compuestos:

- Aceites minerales:  
Generan vertidos tóxicos, además pueden mezclarse con facilidad con compuestos orgánicos tóxicos, y su eliminación mediante combustión produce también graves contaminaciones del aire, emitiendo gases tóxicos de cloro, azufre, fósforo y, incluso, plomo
- Ácidos carboxílicos con aminas:  
Estos compuestos no tienen un efecto nocivo sobre el medio ambiente. Se pueden encontrar en la naturaleza y se usan en medicamentos y otros productos.
- Ácido carbónico con 2-aminoetanol:  
El 2-aminoetanol, es un compuesto que puede ser explosivo, generar nubes tóxicas si se vaporiza o dispersa y puede provocar graves quemaduras en la piel y lesiones oculares.  
No se debe verter al medio acuático, ya que es tóxico para los organismos acuáticos y generar efectos nocivos prolongados.
- Alcoholes etoxilados:  
No representan un peligro para el medio ambiente, ya que pueden ser biodegradados por organismos.
- 2,2 metilaminodietanol:  
Es un compuesto inflamable y que en contacto con la piel puede causar quemaduras e irritación. Es nocivo para el medio acuático, produciendo efectos adversos sobre crustáceos y algas en mayor medida y provocando cambios de pH.

### 10.2. Efluentes.

A continuación, se van a analizar las corrientes de efluentes del proceso, las cuales son una consecuencia directa de las materias primas de la alimentación:

1) Efluentes gaseosos.

Componentes	[Kg/h]	[%ww]
<b>Nº Corriente</b>	<b>14</b>	<b>14</b>
Agua	3.579,63	100,00%
Aceite	-	0,00%
Acid carboxilicos con aminas	-	0,00%
Acido carbónico con 2-aminoetanol (1:2)	-	0,00%
Alcoholes (C16-C18) etoxilados	-	0,00%
2,2 metilaminodietanol	-	0,00%
<b>Total</b>	<b>3.579,63</b>	<b>100%</b>

Tabla 9. Composición de efluente gaseoso.

El proceso no presenta un efluente gaseoso como tal, no obstante, se va a tener en cuenta una de las corrientes de vapor, en el caso de que hubiera una fuga. Se ha escogido en representación la corriente 14.

Las corrientes de vapor del proceso están compuestas únicamente por vapor de agua, por lo que una vez condensado puede verterse al medio ambiente o conservarse en un circuito cerrado, y en caso de escape no hay problema en emitirlo a la atmosfera.

2) Efluentes líquidos.

Componentes	[kg/h]	[%ww]
Agua	12,98	5,09%
Aceite	120,18	47,16%
Acid carboxilicos con aminas	61,18	24,01%
Acido carbónico con 2-aminoetanol (1:2)	33,87	13,29%
Alcoholes (C16-C18) etoxilados	11,61	4,56%
2,2 metilaminodietanol	15,02	5,89%
<b>Total</b>	<b>254,84</b>	<b>100%</b>

Tabla 10. Composición efluente líquido

Esta corriente, está compuesta por el resto de los compuestos, que no han sido evaporados. La corriente en si constituye los lodos de las taladrinas diluidas, y representa un residuo incluso más toxico y peligroso, por contener todos los componentes en mayores concentraciones.

Su vertido al medio ambiente está prohibido, y debe llevarse a una planta de inertización, o a un proceso de re-refinamiento, para obtener una base lubricante de grado combustible.

El postratamiento de estos lodos está subvencionado por el Sistema Integrado de Gestión de Residuos (SIGAUS), siempre que cumpla unos ciertos límites (como un porcentaje de residuo seco superior al 90%), como es este caso.

## 11. Evaluación económica.

Para esta planta, no pueden emplearse las herramientas habituales de evaluación económica del VAN (Valor Actual Neto) o el TIR (Tasa Interna de Retorno), debido a que no genera beneficios económicos de forma directa, ya que las retribuciones económicas por camión cisterna retirado, apenas superan los 100€.

Por otro lado, tampoco existe un coste de la materia prima, ya que es un residuo que se genera del proceso principal.

Por tanto, el método de evaluación económica seleccionado es el de ahorro de costes. Se va a enfrentar el coste materia y de operación de la planta propuesta frente a las actuales opciones.

Para calcular el coste de los equipos, se ha empleado la herramienta de ASPEN de evaluación de costes, obteniendo las siguientes cantidades:

Equipo	Coste unitario	Coste total
C-101	53.200,34 €	53.200,34 €
C-102	22.312,15 €	22.312,15 €
E-101	273.300,00 €	273.300,00 €
E-102	77.400,58 €	77.400,58 €
D-101	129.800,00 €	129.800,00 €
D-102	126.300,00 €	126.300,00 €
P-101 A/B	3.406,32 €	6.812,64 €
P-102 A/B	3.406,32 €	6.812,64 €
P-103 A/B	3.302,67 €	6.605,24 €
		702.543,59 €

El coste total asciende a 702.543,24€, a lo cual hay que sumarle el coste de I+D y de ingeniería básica, que asciende a 49.178,05€.

Por tanto, la inversión necesaria para realizar el proyecto es de 751.721,64€

Para los costes operacionales, se toman los siguientes escenarios.

1. Retirada de residuo para tratamiento fuera de las instalaciones.

La forma más simple de deshacerse del residuo es la retirada directa del mismo, no obstante, tiene un coste elevado. La planta antigua se ha diseñado para tratar 70 m<sup>3</sup>/día de residuo, por lo que habría que retirar la misma cantidad de residuo sin tratar en camiones cisterna, lo que equivale a 2 camiones por día aproximadamente.

Coste de retirada y tratamiento de 1 camión cisterna: 3.200€.

2. Tratamiento mediante las instalaciones actuales.

En este caso, la capacidad de tratamiento de la planta actual está en torno a los 50 m<sup>3</sup>/día. Actualmente, se trata con las instalaciones disponibles y se retira 1 camión por semana de concentrado proveniente de los 3 evaporadores, cuyo coste es menor que el del residuo completamente diluido.

Coste de retirada y tratamiento de 1 camión cisterna de concentrado intermedio: 2.700€

Coste de operación de la instalación (3 motores de 99 kW): 297 kW

Coste del kWh: 0,0671€

3. Tratamiento mediante la planta propuesta.

La capacidad de tratamiento es suficiente para no tener que extraer residuo sin tratar.

Coste de operación de la instalación (2 motores combinados de 136 y 7 kW): 143 kW

Coste del kWh: 0,0671€

En ninguna de las tres opciones se incluyen los costes de un técnico para el control o mantenimiento de la planta, esto se debe a que la factoría posee equipos de mantenimiento multidisciplinarios con este objetivo.

Mes	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio
<b>Costes (retirada directa)</b>	192.000,00 €	384.000,00 €	576.000,00 €	768.000,00 €	960.000,00 €	1.152.000,00 €	1.344.000,00 €
<b>Costes (Planta actual)</b>	27.148,66 €	54.297,33 €	81.445,99 €	108.594,66 €	135.743,32 €	162.891,98 €	190.040,65 €
<b>Costes (Planta nueva)</b>	6.908,62 €	13.817,23 €	20.725,85 €	27.634,46 €	34.543,08 €	41.451,70 €	48.360,31 €

Mes	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
<b>Costes (retirada directa)</b>	1.536.000,00 €	1.728.000,00 €	1.920.000,00 €	2.112.000,00 €	2.304.000,00 €
<b>Costes (Planta actual)</b>	217.189,31 €	244.337,98 €	271.486,64 €	298.635,30 €	325.783,97 €
<b>Costes (Planta nueva)</b>	55.268,93 €	62.177,54 €	69.086,16 €	75.994,78 €	82.903,39 €

Ilustración 13. Costes de operación anuales.

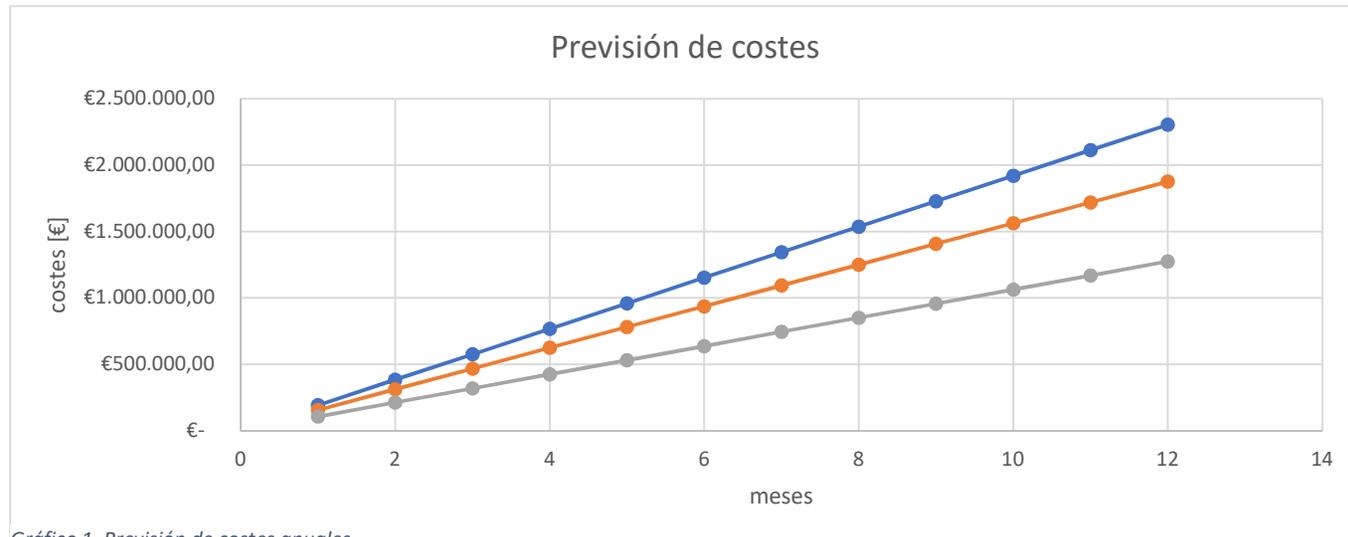


Gráfico 1. Previsión de costes anuales

Para ver la amortización de la planta, también se va a ver en función de la reducción de costes entre las 2 opciones más rentables, es decir, entre tratar el residuo con la planta actual o mediante la propuesta.

Años	0	1	2	3	4
<b>Actual</b>	- €	325.783,97 €	651.567,94 €	977.351,90 €	1.303.135,87 €
<b>Nueva</b>	751.721,64 €	834.625,03 €	917.528,43 €	1.000.431,82 €	1.083.335,21 €

Tabla 11. Costes de amortización

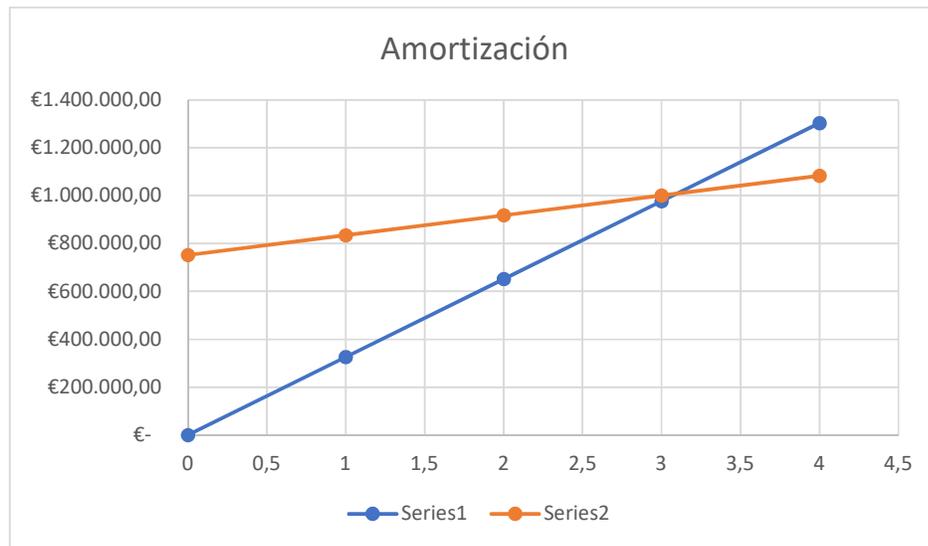


Gráfico 2. Amortización

Se puede observar que se recuperan los costes de inversión en el 3 año, en el cual se igualan los costes operacionales de ambos procesos, al 4 año la nueva instalación se muestra más rentable.

## 12. Bibliografía.

1. AEMET. (21 de 07 de 2020). *Aemet.es*. Obtenido de [http://www.aemet.es/es/serviciosclimaticos/vigilancia\\_clima/](http://www.aemet.es/es/serviciosclimaticos/vigilancia_clima/)
2. Burke, J. (2006). *Manufacturing Engineering and Materials Processing*. Boca Ratón: 2ª Edición, Taylor & Francis.
3. El-Baradie, M. (1996). *Journal of Materials Processing Technology*. Dublin City: Elsevier.
4. Estrems Amestoy, M. (2007). *Principios de Mecanizado y Planificación de Procesos, Capítulo 5*. Cartagena.
5. IHOBE, Sociedad Publica de Gestión Ambiental. (1999). *Taladrinas Agotadas: un Residuo a Reducir*. País Vasco: Gobierno Vasco.
6. Ilissi Monteiro, M. (2006). *Tratamento de efluentes oleosos provenientes da industria metal-mêcnica e seu reuso*. Sao Paulo: Escola de Engenharia de Lorena da Universidad de Sao Paulo.
7. Kemmer, F. (1998). *The Nalco Water Handbook, Emulsion Breaking*. New York: 2ª Edición, McGraw Hill.
8. Mato Chain, F. (2020). *HIX*. Obtenido de <http://hix.eii.uva.es/hix/fb.pl>
9. *Observatorio del Aceite Usado*. (23 de 07 de 2020). Obtenido de <http://www.observatoriodelaceiteusado.sigaus.es/>
10. Orden MAM/304/2002. (8 de febrero de 2002). *Por la que se publican las opciones de valorización y eliminación de residuos y la Lista Europea de Residuos*. BOE 043.
11. Real Decreto 679/2006, M. (3 de junio de 2006). *Por el que se regula la gestión de los aceites industriales usados*.
12. SIGAUS. (23 de Julio de 2020). *SIGAUS (Sistema Integral de Gestión de Aceites Usados)*. Obtenido de <http://www.sigaus.es/>
13. Suárez López, J., & al., e. (2015). *Electrocoagulación, Electroflocculación (FT-AVA-002)*. Universidad de Coruña: Inditex.
14. Ures Rodríguez, P., & et al. (2015). *Filtración en Membrana y Ósmosis Inversa (FT-TER-005)*. Universidad de Coruña: Inditex.
15. Wit, G. (2017). *Advanced Machining Processes of Metallic Materials, Theory, Modeling and Applications*. Poland: Elsevier.