



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



ESCUELA TÉCNICA
SUPERIOR INGENIEROS
INDUSTRIALES VALENCIA

TRABAJO FIN DE GRADO EN INGENIERÍA QUÍMICA

ESTUDIO EXPERIMENTAL Y DISEÑO DE UN TRATAMIENTO PARA LA ELIMINACIÓN DE OLORES EN LOS RESIDUOS PLÁSTICOS (50 kg/d) PARA SU POSTERIOR RECICLAJE

AUTOR: ÁLVARO PASCUAL CORDERO

TUTORA: M^o AMPARO BES PIÁ

COTUTOR: JOSÉ ANTONIO MENDOZA ROCA

Curso Académico: 2018-19

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, quiero agradecer a mis tutores Amparo y Jose Antonio la oportunidad de realizar este trabajo y todo el tiempo dedicado a lo largo de estos meses para asistirme en mis dudas y los problemas que pudiesen surgir.

También agradecer a mi familia, por la confianza puesta en mi desde siempre que me ha animado a seguir adelante en todo momento, por dura que fuese la situación.

Por último, pero no menos importante, dar las gracias a mis compañeros y amigos por estos cuatro años, porque han sido lo más especial de la carrera y una motivación para ir cada día a clase.

RESUMEN

El presente Trabajo de Fin de Grado tiene como objetivo el diseño de un tratamiento para la eliminación de olores en residuos plásticos, en concreto, para una cantidad de 50 kg diarios. Para ello se ha realizado un estudio experimental probando diversas sustancias (agua, detergente y éter metílico de dipropilenglicol) en diferentes condiciones de operación (temperatura, tiempo de agitación y concentración) con el fin de determinar la efectividad de las mismas. Posteriormente se ha realizado un análisis estadístico de los resultados obtenidos y una caracterización de las aguas residuales generadas.

En base a los resultados experimentales obtenidos, se ha diseñado un proceso discontinuo a escala industrial y se ha realizado un estudio económico del mismo, tras lo cual se ha presupuestado el proyecto completo.

Palabras clave: plásticos, eliminación de olores, diseño industrial

RESUM

El present Treball Final de Grau té com a objectiu el disseny d'un tractament per a l'eliminació d'olors en residus plàstics, en concret, per a una quantitat de 50 kg diaris. Per això s'ha realitzat un estudi experimental provant diverses substàncies (aigua, detergent y èter metílic de dipropilenglicol) en diferents condicions d'operació (temperatura, temps d'agitació y concentració), amb la finalitat de determinar la efectivitat de les mateixes. Posteriorment s'ha realitzat un anàlisi estadístic dels resultats obtinguts i una caracterització de les aigües residuals generades.

A partir dels resultats experimentals, s'ha dissenyat un procés discontinu a escala industrial i s'ha realitzat un estudi econòmic del mateix, després del qual s'ha pressupostat el projecte al complet.

Paraules clau: plàstics, eliminació d'olors, disseny industrial

ABSTRACT

The aim of this Final Project is to design a treatment for the elimination of odors in plastic wastes, specifically, for a quantity of 50 kg per day. To achieve this, an experimental study was carried out with different substances (water, detergent and dipropylenglycol methyl ether) at different operating conditions (temperature, agitation time and concentration), in order to determine their effectivity. After that, a statistical analysis of the obtained results has been carried out and a characterization of the generated waste water.

Taking into consideration the obtained results during the essays, a discontinuous process has been designed at industrial scale, followed by an economic study of it. Also, the budget of the project has been estimated.

Key words: plastics, odor elimination, industrial design

DOCUMENTOS DEL TFG

- Memoria

1. OBJETO	17
2. JUSTIFICACIÓN	18
3. INTRODUCCIÓN.....	19
3.1. Definición, clasificación y producción.....	19
3.2. Reciclaje del plástico	23
3.4. Aguas residuales.....	27
4. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL.....	28
4.1. Sustancias y seguridad.....	28
4.2. Equipos y material	28
4.3. Metodología de los ensayos de desodorización.....	33
5. RESULTADOS EXPERIMENTALES.....	36
5.1. Resultados del tratamiento con agua	36
5.2. Resultados del tratamiento con detergente.....	41
5.3. Resultados del tratamiento con alcohol.....	47
6. CONCLUSIONES DE LA PARTE EXPERIMENTAL Y EL ESTUDIO ESTADÍSTICO	55
7. DISEÑO DE LA INSTALACIÓN	56
7.1. Diseño del cilindro móvil.....	57
7.2. Diseño del tanque.....	59
7.3. Diseño del sistema de calefacción	61
7.4. Diseño del sistema de bombeo	61
7.5. Diseño del sistema de agitación.....	62
7.6. Selección de las condiciones de operación en la instalación a partir del estudio económico de las mismas.....	64
8. DESCRIPCIÓN DE LA INSTALACIÓN.....	79
9. ESTUDIO ECONÓMICO	80
9.1. Energía	81
9.2. Personal	81
9.3. Reactivos.....	81
9.4. Varios	82
9.5. Resumen	82
10. CONCLUSIONES GENERALES.....	83
11. BIBLIOGRAFÍA	84

ANEXO I: FICHAS DE SEGURIDAD	89
---	-----------

- **Planos**

PLANO 1: DIAGRAMA DE FLUJO	3
PLANO 2: VISTAS DEL CILINDRO	5
PLANO 3: VISTAS DEL TANQUE	7
PLANO 4: DISTRIBUCIÓN EN PLANTA.....	9

- **Presupuesto**

1. PRESUPUESTO PARCIAL.....	5
1.1. Presupuesto de mano de obra.....	5
1.2. Presupuesto de material.....	5
2. PRESUPUESTO DE INVERSIÓN.....	7
3. PRESUPUESTO DE EJECUCIÓN MATERIAL.....	8
4. PRESUPUESTO DE EJECUCIÓN POR CONTRATA.....	8
5. PRESUPUESTO BASE DE LICITACIÓN.....	9

DOCUMENTO 1. MEMORIA

ÍNDICE DE LA MEMORIA

1. OBJETO	17
2. JUSTIFICACIÓN	18
3. INTRODUCCIÓN	19
3.1. Definición, clasificación y producción	19
3.2. Reciclaje del plástico	23
3.4. Aguas residuales	27
4. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL	28
4.1. Sustancias y seguridad	28
4.2. Equipos y material	28
4.3. Metodología de los ensayos de desodorización	33
5. RESULTADOS EXPERIMENTALES	36
5.1. Resultados del tratamiento con agua	36
5.2. Resultados del tratamiento con detergente	41
5.3. Resultados del tratamiento con alcohol	47
6. CONCLUSIONES DE LA PARTE EXPERIMENTAL Y EL ESTUDIO ESTADÍSTICO	55
7. DISEÑO DE LA INSTALACIÓN	56
7.1. Diseño del cilindro móvil	57
7.2. Diseño del tanque	59
7.3. Diseño del sistema de calefacción	61
7.4. Diseño del sistema de bombeo	61
7.5. Diseño del sistema de agitación	62
7.6. Selección de las condiciones de operación en la instalación a partir del estudio económico de las mismas	64
8. DESCRIPCIÓN DE LA INSTALACIÓN	79
9. ESTUDIO ECONÓMICO	80
9.1. Energía	81
9.2. Personal	81
9.3. Reactivos	81
9.4. Varios	82
9.5. Resumen	82
10. CONCLUSIONES GENERALES	83
11. BIBLIOGRAFÍA	84
ANEXO I: FICHAS DE SEGURIDAD	89

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1. PRODUCCIÓN GLOBAL DE PLÁSTICO DESDE 1950 HASTA LA ACTUALIDAD EN TN/AÑO [5].	19
FIGURA 2. PORCENTAJE ESTIMADO DE RESIDUO PLÁSTICO SEGÚN EL TIPO DE GESTIÓN [5].	20
FIGURA 3. TIEMPO DE DESCOMPOSICIÓN DE DISTINTOS TIPOS DE PLÁSTICOS [7].	21
FIGURA 4. SÍMBOLO QUE REFLEJA QUE EL ENVASE ES APTO PARA INTERACCIONAR CON ALIMENTOS [9].	22
FIGURA 5. SÍMBOLOS QUE IDENTIFICAN EL TIPO DE PLÁSTICO DE UN MATERIAL [9].	22
FIGURA 6. EJEMPLO DE UN PROCESO DE RECICLAJE DE PLÁSTICO [12].	25
FIGURA 7. MUESTRAS DE PLÁSTICO A TRATAR.	28
FIGURA 8. MEDIDA DE PH Y CONDUCTIVIDAD.	29
FIGURA 9. MEDIDA DE TURBIDEZ.	30
FIGURA 10. KIT ESTÁNDAR DE DQO DE LA MARCA MERCK.	31
FIGURA 11. TERMORREACTOR UTILIZADO PARA CALENTAR LAS PROBETAS PARA LA MEDICIÓN DE LA DQO.	31
FIGURA 12. FOTÓMETRO PARA LA MEDICIÓN DE DQO.	32
FIGURA 13. ASPECTO DE UNA MUESTRA DE PLÁSTICO EN MEDIO ACUOSO (5G/500ML).	33
FIGURA 14. ETAPA DE AGITACIÓN Y FILTRACIÓN POSTERIOR DEL AGUA RESIDUAL.	34
FIGURA 15. ELIMINACIÓN DE RESTOS DEL TRATAMIENTO MEDIANTE LAVADO.	35
FIGURA 16. AGUAS RESIDUALES A 40°C DURANTE 10, 15 Y 20 MINUTOS RESPECTIVAMENTE, T1.	36
FIGURA 17. RELACIÓN ENTRE EL PH Y TEMPERATURA Y TIEMPO (T1).	37
FIGURA 18. SUPERFICIE DE RESPUESTA ESTIMADA PARA EL PH SEGÚN LA TEMPERATURA Y TIEMPO (T1).	37
FIGURA 19. RELACIÓN ENTRE LA TURBIDEZ Y TEMPERATURA Y TIEMPO (T1).	38
FIGURA 20. SUPERFICIE DE RESPUESTA ESTIMADA PARA LA TURBIDEZ SEGÚN LA TEMPERATURA Y TIEMPO (T1).	38
FIGURA 21. RELACIÓN ENTRE LA CONDUCTIVIDAD Y TEMPERATURA Y TIEMPO (T1).	39
FIGURA 22. SUPERFICIE DE RESPUESTA ESTIMADA PARA LA CONDUCTIVIDAD SEGÚN TEMPERATURA Y TIEMPO (T1).	39
FIGURA 23. RELACIÓN ENTRE LA DQO Y TEMPERATURA Y TIEMPO (T1).	40
FIGURA 24. SUPERFICIE DE RESPUESTA ESTIMADA PARA LA DQO SEGÚN LA TEMPERATURA Y TIEMPO (T1).	40
FIGURA 25. MUESTRA DE DETERGENTE DE CONCENTRACIÓN 2% TRATADO A 20°C DURANTE 20 MINUTOS.	41
FIGURA 26. RELACIÓN ENTRE PH Y TEMPERATURA, TIEMPO Y CONCENTRACIÓN (T2).	42
FIGURA 27. SUPERFICIE DE RESPUESTA ESTIMADA PARA EL PH SEGÚN TEMPERATURA Y CONCENTRACIÓN, A TIEMPO CONSTANTE (T2).	42
FIGURA 28. RELACIÓN ENTRE CONDUCTIVIDAD Y TEMPERATURA, TIEMPO Y CONCENTRACIÓN (T2).	43
FIGURA 29. SUPERFICIE DE RESPUESTA ESTIMADA PARA LA CONDUCTIVIDAD SEGÚN TEMPERATURA Y CONCENTRACIÓN, A TIEMPO CONSTANTE (T2).	43
FIGURA 30. RELACIÓN ENTRE TURBIDEZ Y TEMPERATURA, TIEMPO Y CONCENTRACIÓN (T2).	44
FIGURA 31. SUPERFICIE DE RESPUESTA ESTIMADA PARA LA TURBIDEZ SEGÚN LA TEMPERATURA Y CONCENTRACIÓN, A TIEMPO CONSTANTE (T2).	44
FIGURA 32. RELACIÓN ENTRE DQO Y TEMPERATURA, TIEMPO Y CONCENTRACIÓN (T2).	45
FIGURA 33. SUPERFICIE DE RESPUESTA ESTIMADA PARA LA DQO SEGÚN LA TEMPERATURA Y CONCENTRACIÓN, A TIEMPO CONSTANTE (T2).	45
FIGURA 34. RELACIÓN ENTRE OLOR Y TEMPERATURA, TIEMPO Y CONCENTRACIÓN (T2).	46
FIGURA 35. SUPERFICIE DE RESPUESTA ESTIMADA PARA LA DQO SEGÚN LA TEMPERATURA Y CONCENTRACIÓN, A TIEMPO CONSTANTE (T2).	46
FIGURA 36. ALCOHOL AL 60% Y 18°C, ANTES Y DESPUÉS DEL TRATAMIENTO DURANTE 20 MINUTOS.	47
FIGURA 37. RELACIÓN ENTRE PH Y TEMPERATURA, TIEMPO Y CONCENTRACIÓN (T3).	48
FIGURA 38. SUPERFICIE DE RESPUESTA ESTIMADA PARA EL PH SEGÚN LA TEMPERATURA Y CONCENTRACIÓN, A TIEMPO CONSTANTE (T3).	48

FIGURA 39. RELACIÓN ENTRE TURBIDEZ Y TEMPERATURA, TIEMPO Y CONCENTRACIÓN (T3).....	49
FIGURA 40. SUPERFICIE DE RESPUESTA ESTIMADA PARA LA TURBIDEZ SEGÚN LA TEMPERATURA Y CONCENTRACIÓN, A TIEMPO CONSTANTE (T3).....	49
FIGURA 41. RELACIÓN ENTRE CONDUCTIVIDAD Y TEMPERATURA, TIEMPO Y CONCENTRACIÓN (T3).	50
FIGURA 42. SUPERFICIE DE RESPUESTA ESTIMADA PARA LA CONDUCTIVIDAD SEGÚN LA TEMPERATURA Y CONCENTRACIÓN, A TIEMPO CONSTANTE (T3).....	50
FIGURA 43. RELACIÓN ENTRE DQO Y TEMPERATURA, TIEMPO Y CONCENTRACIÓN (T3).....	51
FIGURA 44. SUPERFICIE DE RESPUESTA ESTIMADA PARA LA DQO SEGÚN TIEMPO Y CONCENTRACIÓN, A TEMPERATURA CONSTANTE (T3).	51
FIGURA 45. RELACIÓN ENTRE OLOR Y TEMPERATURA, TIEMPO Y CONCENTRACIÓN (T3).	52
FIGURA 46. SUPERFICIE DE RESPUESTA ESTIMADA PARA EL OLOR SEGÚN TIEMPO Y CONCENTRACIÓN, A TEMPERATURA DE 20°C (T3).	52
FIGURA 47. SUPERFICIE DE RESPUESTA ESTIMADA PARA EL OLOR SEGÚN TIEMPO Y CONCENTRACIÓN, A TEMPERATURA DE 40°C (T3).	53
FIGURA 48. SUPERFICIE DE RESPUESTA ESTIMADA PARA EL OLOR SEGÚN TIEMPO Y CONCENTRACIÓN, A TEMPERATURA DE 60°C (T3).	53
FIGURA 49. FILTRO DE CELULOSA.	58
FIGURA 50. VISTA DE SECCIÓN DEL CILINDRO.	58
FIGURA 51. VISTA DE SECCIÓN DEL TANQUE DE MEZCLADO.	60
FIGURA 52. PARÁMETROS PARA EL CÁLCULO DE LA AGITACIÓN [28].	63
FIGURA 53. DATOS DEL TANQUE PARA EL CÁLCULO DEL COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA DE CALOR [28].	67
FIGURA 54. DATOS DE LA CAMISA Y EL INTERIOR DEL TANQUE PARA EL CÁLCULO DEL COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA DE CALOR [28].	68
FIGURA 55. PROPIEDADES DE LA MEZCLA EN LAS CONDICIONES Nº 4.	75
FIGURA 56. DISTRIBUCIÓN EN PLANTA CON LA NUMERACIÓN DE LOS PASOS	80

1. OBJETO

El objetivo de este trabajo de fin de grado es realizar el diseño de un proceso de eliminación de olores en plásticos para su posterior reutilización. Para ello es necesario alcanzar algunos objetivos intermedios.

El primero de ellos es la búsqueda bibliográfica en el campo de la eliminación de olores para la identificación de sustancias y métodos previamente utilizados para este fin.

A continuación, entre la información seleccionada se elegirán los métodos más adecuados para el estudio y se probará la eficacia de cada sustancia para el plástico objetivo, determinando la más apta, así como las condiciones en las que ha de trabajar.

Por último, se realizará un diseño para el tratamiento de 50 kg diarios, adecuado a las condiciones previamente obtenidas mediante el análisis de los resultados y un estudio económico del diseño y del propio proceso, con el objetivo de constatar su viabilidad.

2. JUSTIFICACIÓN

Es debido a la cantidad ingente de productos que se consumen diariamente que la cantidad de residuos generados ha aumentado, lo que hizo necesario establecer una jerarquía a la hora de gestionar todos estos desechos. Comenzando por evitar la generación de éstos y reutilizarlos todo lo que sea racionalmente posible, el reciclaje de los mismos es la siguiente opción disponible, seguida de otros tipos de valoración, incluida la energética, y su disposición como último recurso [1]. Sin embargo, también es necesario que los materiales reciclados puedan competir en precio y calidad con unos recién fabricados. Es por ello que surge la necesidad de estudiar las operaciones del reciclaje y las que lo preceden, asegurando un proceso que evite la necesidad de verter estos residuos.

Esto no es un problema que pase desapercibido actualmente, y se hace obvio cuando varios de los *Objetivos de Desarrollo Sostenible* marcados por la ONU, afectan directa o indirectamente al reciclaje de residuos en general y al excesivo uso de plástico en concreto. El principal objetivo que afecta al reciclaje es el nº 12: *“Producción y consumo responsable”*, donde se habla de *“reducir considerablemente la generación de desechos mediante actividades de prevención, reducción, reciclado y reutilización”* [2], además de animar a las empresas a adoptar sistemas de gestión y prácticas sostenibles para sus residuos. Otros objetivos, como el nº9, *“Industria, innovación e infraestructura”* o el nº11, *“Ciudades y comunidades sostenibles”*, también piden sistemas de gestión y aprovechamiento de los residuos. Por último, y en lo referente a los plásticos, el objetivo nº14, *“Vida submarina”*, hace especial hincapié en el peligro que supone para la fauna y flora marina actual la cantidad de vertidos plásticos que se hacen actualmente, lo que requiere acción inmediata.

Para poder sustituir a un material plástico virgen, un plástico reciclado debe poder aportar unas características de calidad suficientes para el proceso que se requiera, ya sea tenacidad, elasticidad, dureza o incluso color, y además hacerlo a un precio competitivo. Para ello es necesario un proceso de reciclaje lo más eficiente posible. Actualmente, las condiciones que debe cumplir un plástico para ser reciclados se encuentran recogidas en el Real Decreto 846/2011 [3], el cual sigue la normativa europea, marcada principalmente por el Reglamento (CE) nº 282/2008. En él se detallan tanto las características que han de tener las materias poliméricas susceptibles de ser recicladas como los procesos mismos de reciclaje.

A la hora de reciclar un plástico, éste no debe contener impurezas que puedan afectar a la calidad, por lo que son necesarias operaciones de separación y limpieza durante el reciclado. En muchos casos la ausencia de olor, o uno lo más neutro posible, es una característica importante que marca la diferencia entre reutilizar el material o desecharlo. Por ello, existe la necesidad de eliminar estos olores que se generan bien durante su uso o bien durante su estancia en contenedores hasta su reciclaje, donde entran en contacto con todo tipo de sustancias, principalmente orgánicas, que dejan un rastro de olor desagradable. Una eliminación suficiente de estos olores permitiría volver a incorporarlo al ciclo de producción, evitando la generación de nuevos residuos plásticos.

3. INTRODUCCIÓN

3.1. Definición, clasificación y producción

“Plástico es el nombre genérico y común que se le da a una serie de sustancias de estructura molecular y características físico-químicas semejantes, cuya mayor virtud es contar con elasticidad y flexibilidad durante un intervalo de temperaturas, permitiendo así su moldeado y adaptación a diversas formas.” [4]. Ésta es una de tantas definiciones que se pueden encontrar sobre el material con mayor uso en todo el mundo, habiendo experimentado un crecimiento exponencial en su aplicación y producción desde sus orígenes como ningún otro material actualmente, tal y como se observa en la **Figura 1**.

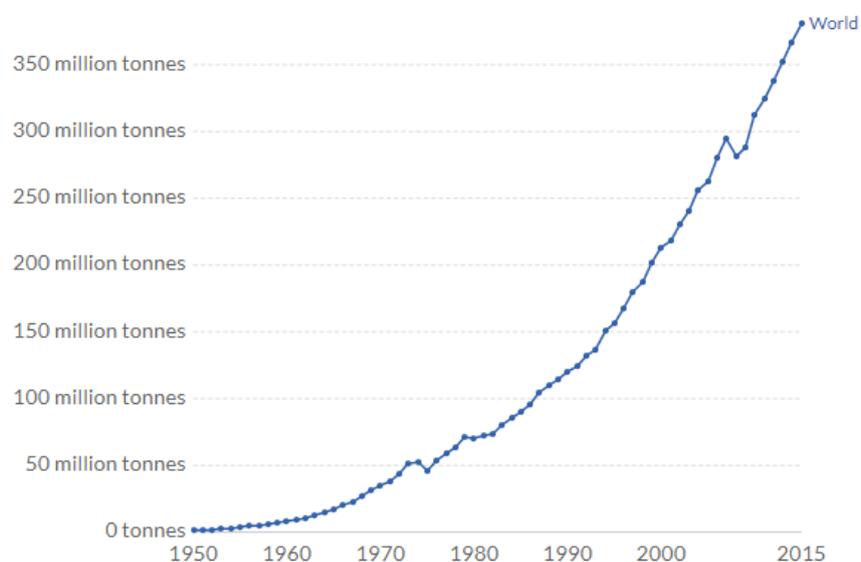


Figura 1. Producción global de plástico desde 1950 hasta la actualidad en tn/año [5].

Se pueden encontrar plásticos de diversos orígenes, sintéticos, orgánicos o una mezcla de ambos. Los polímeros de origen orgánicos provienen de fuentes renovables o bacterianas, como el ácido poliláctico (PLA) o los polihidroxialcanoatos (PHA), respectivamente. Sin embargo, un porcentaje mayoritario de los plásticos se producen actualmente de derivados del petróleo, son los denominados plásticos sintéticos. Esto es debido a que su fabricación es muy sencilla, y su coste, bajo. Además, existe una gran variedad de plásticos según su conformación, los monómeros utilizados en su fabricación, su comportamiento frente al calor... Y no solo eso, si no que sus propiedades son muy fáciles de cambiar a elección, y por lo tanto adaptar a las diferentes necesidades, mediante la adición de distintas sustancias durante su síntesis. Entre los plásticos más utilizados se encuentra el polietilentereftalato, conocido como PET (botellas de plástico), el policloruro de vinilo o PVC (tuberías), el polipropileno (componentes de automóviles), etc.

El proceso de producción comprende dos grandes partes: la formación de las cadenas poliméricas, en el que los monómeros se unen para formar cadenas más largas dando lugar al polímero que se conocerá como plástico posteriormente, y la conformación, en la que, a los polímeros formados con anterioridad, normalmente en forma de resina o grano, se les da la forma deseada mediante diversas técnicas. Económicamente, es un proceso muy eficiente, ya que se obtiene una gran cantidad de material por un precio irrisorio, y la demanda es muy grande, dado que prácticamente todo lo que se fabrica actualmente contiene de alguna u otra forma plástico en su composición. Sin embargo, esto crea un problema, ya que los plásticos derivados del petróleo no son biodegradables, y sus tiempos de descomposición son mucho más altos que su vida útil, lo que provoca una gran cantidad de residuos plásticos que se acumulan y deben gestionarse.

Culturas antiguas como la mesoamericana ya dieron un uso a plásticos como el caucho natural en la antigüedad, pero no fue hasta finales del siglo XIX cuando se empezaron a investigar estos materiales y se dio paso a la industria plástica. Esta industria ve sus inicios en 1909 con el desarrollo de los primeros plásticos termoestables y a partir de entonces, los tipos de plástico, la investigación sobre ellos y el desarrollo de nuevas aplicaciones no dejó de crecer.

Desde 1950 se han producido más de 8 mil millones de toneladas y sólo durante 2015 se produjeron más de 380 millones de toneladas en todo el mundo [5]. Además, de esos 380 millones, aproximadamente 300 se transformaron en residuos. Esto es debido principalmente a la fabricación de plásticos de un solo uso o dicho comúnmente, de usar y tirar. También, como se ha mencionado anteriormente, la vida útil de un plástico es mucho menor que su tiempo de descomposición. Como ejemplo de esto encontramos las bolsas de plástico, las cuales apenas suelen usarse un par de veces, mientras que tardan entre 5 y 10 años en descomponerse naturalmente.

Esto podría no resultar problemático si no fuese porque tan solo un 19,5% de ese plástico es reciclado, mientras que un 25,5% se incinera y el resto, un 55% acaba en vertederos autorizados o en ríos y mares, entre otros [6]. En la **Figura 2** se puede ver la evolución en el destino de los residuos plásticos desde 1980.

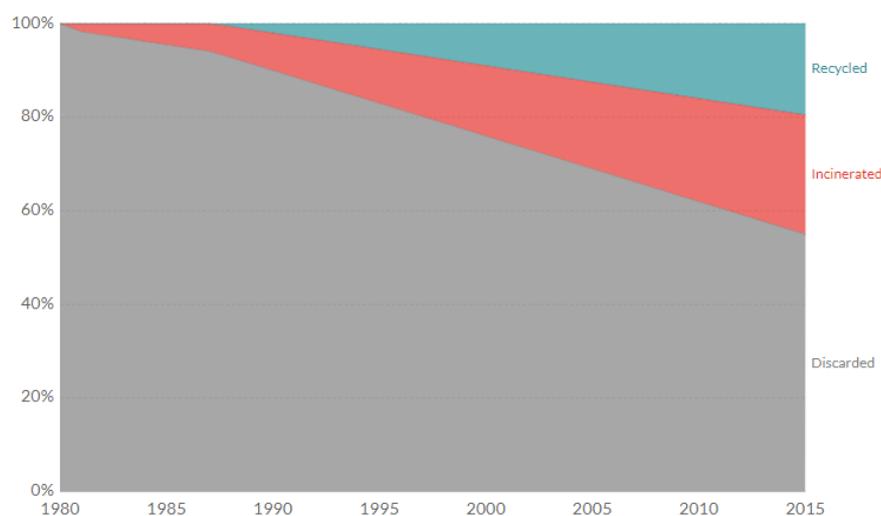


Figura 2. Porcentaje estimado de residuo plástico según el tipo de gestión [5].

Esta cantidad ingente de plástico anual tratado como residuo inútil supone un problema importante para el medio ambiente y, además, dada su dependencia, promueve el uso de combustibles fósiles, en concreto del petróleo. Al existir muchos tipos distintos de plásticos, su degradabilidad varía según de cual se hable, sin embargo, aumenta en todos los casos al encontrarse en el mar debido a las menores temperaturas y acceso a oxígeno y a la luz del sol. Las bolsas de plástico utilizadas diariamente tardan de media 10 años en degradarse, con toda la contaminación y problemas que puedan acarrear en ese tiempo. Otros tipos de plástico pueden tardar más de 500 años, como en caso de botellas de PET. Se pueden ver otros ejemplos en la **Figura 3**.



Figura 3. Tiempo de descomposición de distintos tipos de plásticos [7].

Por todo esto es necesario abrir nuevas vías de investigación, hacia la creación o el refinado de nuevos procesos y materiales que permitan sustituir al plástico y tengan un impacto menor en el medio ambiente. Sin embargo, este es un proceso lento y complicado, y el planeta no puede esperar, por lo que es necesario buscar soluciones rápidas e inmediatas para reducir la producción y, por tanto, los desechos plásticos.

El caso de España es significativamente más esperanzador que el de la media mundial. En datos de 2017, de los 2,4 millones de toneladas generados ese año, un 41% se recicló, colocando a España en segundo lugar en Europa en cuanto a reciclaje de plásticos. Por el contrario, tan solo un 20% de esos residuos se aprovechan como fuente de combustible para la producción de energía, lo que deja a España como uno de los países europeos que menos valoración energética realiza. Y esta problemática se acentúa cuando el resto del porcentaje no tiene más remedio que acabar, con suerte, en vertederos. Esto supone casi un millón de toneladas de plástico sin tratar anuales y un problema que requiere una solución rápida [8].

Ante esta necesidad de actuación inminente, la salida principal es el reciclaje. Actualmente, la solución más eficaz es mejorar las opciones de reciclaje existentes, y generar un plástico reciclado de calidad suficiente para satisfacer las necesidades de los productos. Esto resulta difícil de realizar en algunos casos, como la industria automovilística, en la que las piezas deben mantener unas propiedades físicas y químicas excelentes para garantizar el buen funcionamiento y la seguridad del usuario. Sin embargo, en industrias como la del envasado, quizás una de las mayores barreras a la hora de reciclar el plástico sea el olor, ya que el envoltorio forma parte de la presentación del producto y no es agradable que un paquete adquiriera un olor desagradable por culpa de dicho envoltorio. El caso del envasado es especial, ya que, según el Real Decreto 2814/1983, los envoltorios de alimentos no podían haber sido reciclados, de lo contrario no eran aptos para este uso, para evitar posibles problemas a la salud. Sin embargo, desde hace unos años, la calidad del reciclaje del plástico ha aumentado y ya existe legislación, tanto a nivel europeo como nacional, que permite el uso de plásticos reciclados que cumplan una serie de condiciones como envoltorio para alimentos, reflejados en el Reglamento (CE) nº 282/2008 y el Real Decreto 1025/2015, respectivamente. Algunas de las medidas incorporadas durante la aplicación de esta legislación requieren el marcado de los envases plásticos para facilitar su separación y asegurar la calidad del reciclaje. Por ejemplo, el símbolo de la **Figura 4** se aplica para envases aptos para entrar en contacto con alimentos, mientras que los de la **Figura 5** indican el tipo de plástico que está marcando. Como se puede observar, los números que se pueden encontrar en los distintos plásticos van del 1 al 7, siendo todos ellos tipos concretos de plástico, a excepción del 7, que recoge todos los que no comprenden los números anteriores. Según la legislación anteriormente mencionada, ningún plástico con el número 7 es apto para el reciclaje, normalmente por ser una mezcla de plásticos. Sin embargo, todo plástico nuevo va a parar al número 7, por lo que es necesaria una actualización de esta normativa. En la **Figura 4** se pueden ver el significado de los distintos números.



Figura 4. Símbolo que refleja que el envase es apto para interaccionar con alimentos [9].



Figura 5. Símbolos que identifican el tipo de plástico de un material [9].

Por lo tanto, es importante adquirir conocimiento sobre en qué aplicaciones se puede utilizar el plástico reciclado y cuáles son las vías para obtenerlo. Actualmente en España, las principales aplicaciones para el plástico reciclado encuentran en su uso en tuberías, piezas industriales y bolsas de distintos tipos. En otros lugares del mundo, el plástico reciclado se usa en mobiliario urbano, en la industria textil y en refuerzo del asfalto de carreteras [10], pero la cantidad de usos para el plástico reciclado es casi tan amplia como la del plástico recién formado. Desde un punto de vista empresarial, el reciclaje del plástico puede aportar grandes beneficios, como mejora de la imagen de la empresa de cara a su respeto por el medioambiente, el acceso a nuevos mercados donde se utilicen plásticos reciclados y la preparación para posibles (y más que probables) futuras regulaciones en el ámbito ambiental. Esto parecer no aportar grandes beneficios económicos simple vista, pero si se tiene en cuenta el cambio que intenta producirse en la economía actual, adoptar políticas de reciclaje y aprovechamiento de los recursos puede poner a la empresa un paso por delante, trayendo consigo beneficios tanto a corto como a largo plazo. Con este cambio de habla de la sustitución del modelo actual de economía lineal, en el que se produce, usa y tira; por uno de economía circular, en el que se alcance el objetivo de residuo cero, ya que todo lo producido se pueda reutilizar o reciclar, ya sea enteramente o por partes. Algunos ejemplos de empresas que están adoptando este tipo de planteamiento son: Coca-Cola, la cual tiene como meta ser capaz de recoger en 2030 el 100% de los envases que comercialice, o la empresa cervecera Damm, cuyos residuos son convertidos en subproductos reutilizables en un 99% [11]. Por ello, a pesar de no otorgar un beneficio económico directo debido al bajo coste y fácil accesibilidad de los plásticos recién fabricados, el plástico reciclado es una opción muy a tener en cuenta.

3.2. Reciclaje del plástico

Existen tres formas principales para procesar el plástico. La primera es el reciclado mecánico, el cual tritura los residuos plásticos y los funde para formar trozos pequeños que se utilizarán para crear nuevos productos plásticos. Es el tipo de reciclado más utilizado. La segunda, la cual implica un gasto energético mayor, se trata del reciclaje químico, en el cual se degrada los polímeros hasta reducirlos a sus monómeros de origen, dejando la posibilidad de manejarlos a voluntad y formar nuevos plásticos. Por último, y aunque no permite la reutilización de los plásticos, se encuentra la incineración, que transforma los plásticos en combustible para la generación de energía. De cualquier forma, todo plástico pasa por las mismas etapas tempranas durante su reciclado, comenzando por la revisión de las condiciones del plástico. Las propiedades más revisadas a la hora de calcular el valor de un plástico a reciclar son:

- **Transparencia y color:** el color del plástico que recicla puede limitar las aplicaciones del producto final, por lo que se aprecia más a la hora del reciclaje un plástico transparente o blanco.
- **Forma:** cuanto menor sea el tamaño del plástico a reciclar, más facilidad da a la hora de procesarlo, por lo que interesa triturarlos y moldearlos en formas concretas para que alcance un precio mayor al venderlo a una planta de reciclaje.
- **Clasificación:** los diferentes tipos de plásticos provocan problemas al reciclarlos conjuntamente, por lo que una correcta separación de las distintas variedades agiliza el proceso.

- **Limpieza:** aspectos como la ausencia de suciedad o de olor ayudan a evitar futuros problemas en la conformación de nuevos productos. Además, los plásticos con impresiones como números de serie o códigos de barras en tinta provocan limitaciones similares a las del color.
- **Fluidez y procesabilidad:** cuanto más fácil sea de procesar un plástico, mayor valor alcanzará a la hora de reciclarlo.

Una vez revisadas estas características y calculado su valor, comienza el proceso de reciclaje, el cual se divide en diferentes etapas según el tipo de reciclado. Aunque todas son viables, interesantes y pueden ser complementarias, la explicación abarcará tan solo el **reciclado mecánico**, por ser el más común y el que requiere una tecnología menos sofisticada. Los pasos que sigue un residuo plástico durante su reciclado mecánico se pueden observar más gráficamente en la **Figura 6** y son los siguientes:

1. **Limpieza inicial:** Preparación del plástico para su separación mediante la eliminación de suciedad superficial como tierra o sustancias que puedan dañar la maquinaria.
2. **Selección y separación:** Los residuos se separan según el tipo de plástico y su compatibilidad, además de por colores para evitar las limitaciones mencionadas anteriormente. Este proceso es relativamente costoso debido al alto precio de los equipos de clasificación, pero también es muy eficiente.
3. **Trituración o molienda:** se reduce el tamaño de los plásticos mediante cuchillas para facilitar su transporte y procesado.
4. **Lavado:** se eliminan las impurezas y contaminantes que quedan en los plásticos triturados. En este paso se produce la eliminación de olores.
5. **Secado:** se elimina el agua y/o el producto usado en el lavado mediante centrifugado.
6. **Homogeneización y extrusión:** se mezcla por medios mecánicos el plástico troceado para homogeneizar el residuo y mediante la aplicación de calor y fricción se funde el material. En este paso se añaden los posibles aditivos que mejoren las propiedades finales del plástico.
7. **Granceado:** Tras pasar por un filtro que asegure que la masa fundida no tiene impurezas problemáticas, se moldea en forma de filamentos y se corta para formar la granza, para finalmente enfriarlo mediante intercambiadores de calor con agua.
8. **Control de calidad y comercialización:** Este proceso varía según las propiedades que ofrezca cada empresa, pero esencialmente, se comprueba que cumple con los estándares marcados y se envasa para su venta.

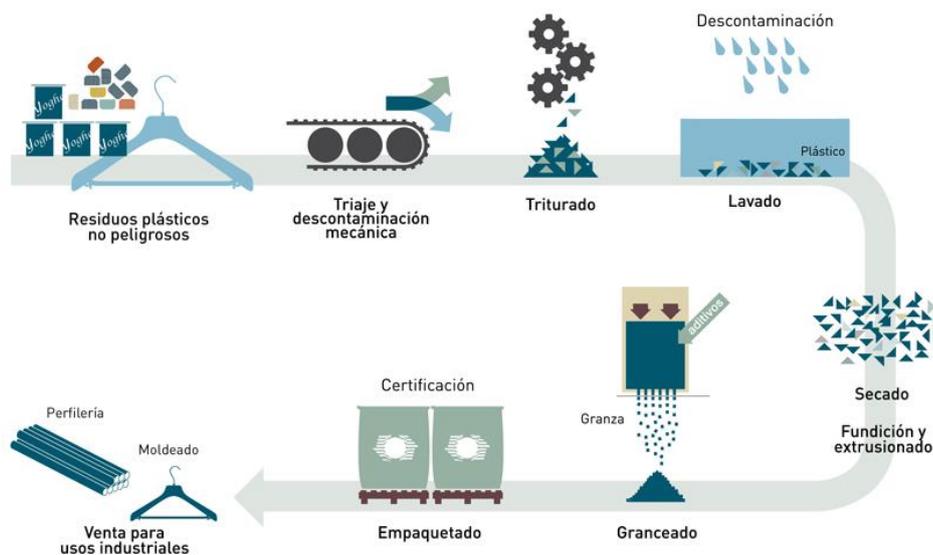


Figura 6. Ejemplo de un proceso de reciclaje de plástico [12].

Hasta la etapa 5 incluida son procesos que podrían llevarse a cabo fácilmente en muchas empresas ajenas al reciclaje, lo que aumentaría el valor de los residuos plásticos al venderlos a una empresa de reciclaje, otorgando beneficios a la empresa. En el caso de este trabajo de fin de grado, la etapa en la que se va a centrar es la número 4, en la que el plástico ya se encuentra separado de otros residuos y triturado. Los contaminantes que se eliminan durante estas etapas pueden ser desde sólidos como tierra hasta líquidos como leche, bebidas refrescantes, restos de comida o de productos de limpieza e higiene o gases producidos por la descomposición de alimentos. Con los lavados actuales, se consigue mejorar la apariencia de los plásticos, pero sigue presentándose la problemática de los olores generados por dichos contaminantes.

Esto plantea la necesidad de buscar tratamientos capaces de eliminar los olores en sólidos, ya que no tiene la misma facilidad que en corrientes gaseosa o líquidas y está mucho menos investigado. Este hecho ha sido evidente a la hora de la búsqueda bibliográfica, ya que existía una cantidad de información muy reducida con respecto a la existente para los fluidos.

3.3. Métodos de eliminación de olores

Al no encontrar ninguna información específica y concreta sobre la eliminación de olores durante el reciclado de residuos plásticos, se hizo una búsqueda general sobre eliminación de olores, con la intención de identificar los principales métodos para eliminación de olor y comprobar si alguno funcionase o fuese extrapolable a este tipo de residuos. Durante esta búsqueda se encontró un libro titulado *“Handbook of Odors in Plastic Materials”* [13], en el que se presentaban varios métodos para la eliminación de olores, pero sin entrar en detalles de procesos concretos. Algunas de las sugerencias eran de lo más común en la eliminación de olores, como el uso de adsorbentes, en concreto el uso de carbón activo, el cual abarca uno de los métodos más eficaces, ya que al hacer pasar una corriente líquida o gaseosa por un lecho de este material se consigue atrapar las sustancias orgánicas que estén contenidas en los plásticos, que normalmente son las causantes del mal olor. El problema aparecía a la hora de utilizar el carbón activo en sólidos, ya que era necesario encontrar una manera de mantener el contacto entre el carbón y el plástico y que a su vez toda la muestra llegase a estar en contacto con

él. Esto generaba problemas desde el planteamiento al tratarse de dos sólidos y desembocaba en soluciones muy intrincadas o con poca certeza de funcionamiento, por lo que se desechó rápidamente. Otros de los métodos más interesantes que se encontraron con posible aplicación fueron los tanques de burbujeo, tanto de oxidación como de oxigenación y fotocátalisis mediante rayos ultravioleta (UV) o radiación ultravioleta de vacío (VUV). Sin embargo, estos requieren un equipo especializado y/o reactivos muy caros, por lo que no hubo oportunidad de valorar su eficacia. Por último, también se encontraron algunos métodos que probaban ser aptos, sin embargo, eran más sofisticados, como la biodegradación o la desgasificación.

A continuación, se encontraron diversos informes de procesos anteriores en los que se había eliminado olores en recipientes plásticos. En ellos se encontraban métodos en los que el residuo plástico se sometía a un baño de alguna sustancia concreta, como alcoholes, detergentes y mezclas salinas, métodos que trabajaban con los olores del plástico en otras etapas del proceso, como hacer el vacío durante sucesivas etapas de extrusión, y métodos que usaban técnicas punteras con sustancias muy valiosas, como CO₂ supercrítico. Los más relevantes se exponen a continuación.

En la patente de 1987 de "The Coca-Cola Company" [14], se sumerge el plástico a limpiar en alcohol hasta que los contaminantes hayan sido extraídos. El alcohol utilizado es el éter metílico de propilenglicol, pero también se menciona la posibilidad de usar otros alcoholes como etanol. Se recomienda un lavado con disolución detergente comercial anterior al alcohol, pero no es estrictamente necesario. La duración del proceso varía entre los 20 y 40 minutos, mientras que la temperatura lo hace entre 60 y 70°C.

Otro de los documentos estudiados se trata de un estudio de 1994 [15] en el que se trata la eliminación de contaminantes orgánicos propios de bebidas con contenido cítrico causantes de fuertes olores. En este proceso, las botellas que contenían las bebidas se limpiaban con agua destilada y a continuación se rellenaban con disoluciones de hidróxido sódico (NaOH) con un pequeño porcentaje de detergente comercial, a temperaturas entre 60 y 70°C. Una vez rellenas entraban a un horno durante 15 minutos para mantener dicha temperatura y se agitaban en periodos de 3 minutos. Después de un tiempo de almacenamiento, se lavaba varias veces con agua destilada para eliminar los rastros de NaOH. Durante el estudio se variaron las condiciones de temperatura, concentración y tiempo de almacenamiento.

En la patente de 2012 por A. Deiser y C. Nettig [16], se utiliza una mezcla de sales como lavado previo al centrifugado en una lavadora. Si bien es cierto que durante el desarrollo de la patente se habla de su uso centrado en la eliminación del olor a sudor en ropa, se menciona su posible aplicación a olores orgánicos en otros materiales.

Posteriormente, se estudiaron las diversas fuentes en busca de las sustancias concretas utilizadas para su reproducción con la mayor similitud posible. Finalmente, los compuestos seleccionados fueron agua de red, detergente comercial y éter metílico de dipropilenglicol.

Por último, una vez realizado el tratamiento sería necesario evaluar cómo ha cambiado el olor de las muestras, por lo que se acudió una vez más a documentación científica en la que se listaban distintos tipos de formas para caracterizar olores. Se encontraron distintos artículos que mencionan formas muy variadas de caracterización de olores, como un análisis sobre olores en relación a diferentes polímeros [13] o un artículo de análisis de olores en envoltorios tras su consumo [17]. Sin

embargo, todos ellos requerían un entrenamiento especial de las personas involucradas, el uso de material especializado como narices químicas o la reunión de muchas personas para encuestarlas. Habiendo desechado la gran mayoría de las opciones ofrecidas, se optó por confiar en el criterio del alumno, estableciendo una escala en la que el valor mayor correspondía al olor de las muestras antes del tratamiento y el mínimo a la ausencia total de olor.

3.4. Aguas residuales

Una vez solucionada toda la problemática que envuelve al proceso y la caracterización de las muestras surge una nueva fuente de contaminación que convendría solucionar dentro del proceso industrial. Con esto se habla de las aguas residuales generadas durante el tratamiento, tanto para el estudio, como para su futuro uso en un diseño industrial. Por ello, y pese a que no se encuentra dentro los objetivos a cumplir en este trabajo de fin de grado, se han caracterizado las distintas aguas residuales generadas en todo momento durante las experiencias, con ánimo de que estos datos puedan utilizarse para el futuro diseño de una línea de tratamiento de aguas industriales.

Se han medido parámetros que podrían presentar cambios importantes al realizar los tratamientos, seleccionados de la legislación pertinente, siendo en este caso la Ordenanza Municipal de Saneamiento de la Comunitat Valenciana, publicada el 10/02/2016 [18]. Estos son: pH, conductividad y la demanda química de oxígeno (DQO). Adicionalmente, se ha medido la turbidez, ya que, a pesar de no estar reflejada directamente en los parámetros a controlar, un valor alto puede denotar problemas en otros parámetros que, si se encuentran mencionados, tales como los sólidos en suspensión o el color. Los valores límites reflejados en la normativa se encuentran resumidos en la **Tabla 1**.

Tabla 1. Valores límite de diferentes parámetros según la Ordenanza Municipal de la C.V. [18].

Parámetro	Concentración instantánea
pH	5,50 – 9,00
Sólidos en suspensión (mg/L)	1.000,00
Materiales sedimentables (mL/L)	20,00
Sólidos gruesos	Ausentes
DBO5 (mg/L)	1.000,00
DQO (mg/L)	1.500,00
Temperatura (°C)	40,00
Conductividad eléctrica a 25° (µS/cm)	5.000,00
Color	Inapreciable a una dilución 1/40

4. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

En este apartado se recogen los ensayos realizados para la eliminación de olores en plásticos procedentes del contenedor amarillo, previamente clasificados y triturados (**Figura 7**). Además, se incluye la parte de seguridad de las sustancias utilizadas, procedimiento experimental, materiales y equipos empleados. Adicionalmente, cabe indicar que los ensayos se realizaron en los laboratorios del Departamento de Ingeniería Química de la Universitat Politècnica de València.



Figura 7. Muestras de plástico a tratar.

4.1. Sustancias y seguridad

Las sustancias escogidas para los tratamientos de eliminación de olores son: agua de red, detergente (Formil Activo superconcentrado) y un disolvente base alcohol (éter metílico de dipropilenglicol), en adelante alcohol. Todas las sustancias se nombran en al menos una de las patentes consultadas en la bibliografía, en el caso del detergente de forma genérica, ya que se habla de utilizar detergentes en varias de las patentes y en el caso del alcohol, aparece mencionado en una patente de Coca-Cola [14]. Se ha estudiado la composición y las fichas técnicas de ambos productos para garantizar un trabajo seguro y con el menor número de riesgos. Se puede encontrar la lista de componentes del detergente en la página del fabricante [19] y la ficha de seguridad del alcohol en el **Anexo I: Fichas de seguridad**.

Tras consultar los documentos mencionados anteriormente, se determina que no es necesario tomar ninguna medida de seguridad adicional, por lo que se utilizarán tan solo guantes y la bata de laboratorio.

4.2. Equipos y material

Durante todo el desarrollo, se ha utilizado diversos instrumentos para realizar el análisis de las muestras, los cuales se listan a continuación:

- **pH-metro:** Para la caracterización de las agua residuales es necesario determinar el valor del pH, ya que como se refleja en la Ordenanza Municipal de Saneamiento [18], el pH es uno de los valores a tener en cuenta a la hora de realizar un vertido a la red municipal de alcantarillado.

El modelo usado es el pH-Meter GLP 21 de Crison (**Figura 8** izquierda), cuyas especificaciones pueden encontrarse en la página del fabricante [20]. Para realizar la medición se coloca el electrodo dentro la disolución a medir y se espera por el valor.

- **Conductímetro:** Al igual que en el caso del pH, la conductividad se encuentra limitada por legislación, por lo que también es un parámetro de necesario control. El modelo utilizado para estas mediciones se trata del EC-Meter GLP 31 de Crison (**Figura 8** derecha), y sus especificaciones las proporciona el mismo fabricante en su sitio web [21]. Su mecanismo de medida es idéntico al pH.

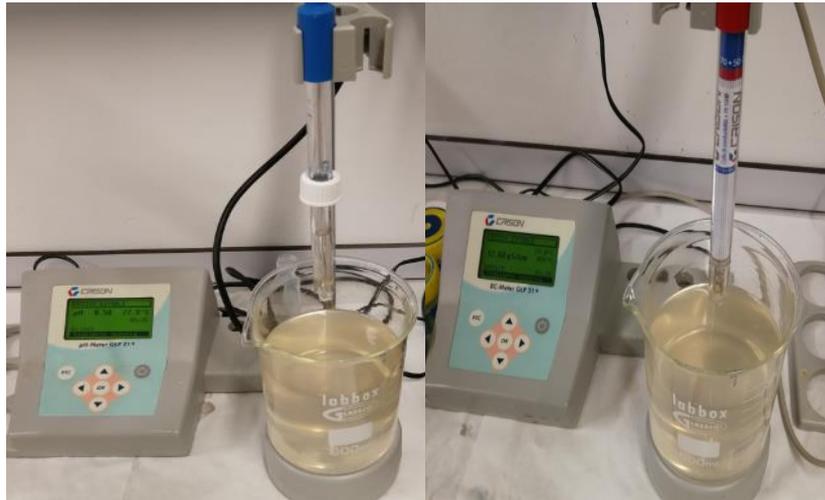


Figura 8. Medida de pH y conductividad.

- **Turbidímetro:** Otro de los parámetros a tener en cuenta es la turbidez. Para ello el modelo utilizado para las mediciones se trata del TURBIDIMETER D-112 de DINKO Instruments (**Figura 9**) y sus características se encuentran en la página del fabricante [22]. Para la medición de la turbidez es recomendable calibrar el equipo cada varias medidas. Para ello se utilizan los patrones proporcionados. Una vez se tiene la certeza de que el equipo mide con precisión, se ha de rellenar el tubo vacío, que se encuentra junto a los patrones, de la disolución a medir. Tras asegurarse de que no quedan gotas, manchas o huellas en la superficie del tubo, se introduce en el equipo y éste elegirá la escala adecuada, tras lo que mostrará el resultado en pantalla. Es importante realizar una buena limpieza del tubo al terminar la medición.



Figura 9. Medida de turbidez.

- **Kits de DQO:** *“La demanda química de oxígeno (DQO) es un parámetro que mide la cantidad de sustancias susceptibles de ser oxidadas por medios químicos que hay disueltas o en suspensión en una muestra líquida. Se utiliza para medir el grado de contaminación y se expresa en miligramos de oxígeno diatómico por litro (mg O₂/L)”* [23]. La DQO es el último de los parámetros reflejados en la legislación que se medirá durante los ensayos. Para los análisis se utilizaron dos tipos de kits (**Figura 10**), de acuerdo al valor esperado de la DQO. El primero, para valores más pequeños, comprende entre 25-1500 mg/L, es proporcionado por MERCK y está adaptado al Fotómetro Spectroquant [24]. Por otro lado, para valores mayores se utilizó un kit que comprendía unos valores de 500-10000 mg/L, de la misma marca que el anterior [25]. Para el uso de estos kits es necesario seguir las instrucciones que se encuentran en sus respectivas cajas. En ellas se especifica las sustancias que generan problemas con cada kit, así como la temperatura, duración y volumen de muestra que hay que utilizar. En el caso del kit para valores pequeños eran necesarios 3 mL de volumen de la muestra a valorar, mientras que en los grandes tan sólo había que añadir 1 mL. Para casos en los que los valores de DQO fuesen muy grandes y se saliesen de escala, sería necesario realizar una dilución en la muestra inicial, para luego deshacerla al calcular el valor final. Una vez la muestra se encuentra mezclada en la probeta, es necesario calentarla a 148°C durante dos horas. Para ello se utilizó un termorreactor.



Figura 10. Kit estándar de DQO de la marca MERCK.

- **Termorreactor:** El modelo de termorreactor utilizado para calentar las muestra es el TR300 de MERCK (**Figura 11**), cuya serie puede encontrarse en la página web de vwr [26]. Este ha de estar calentando las probetas durante dos horas a 148°C, tras lo cual se dejarán enfriar fuera del termorreactor durante 40 minutos, agitando la mezcla al cumplirse los 10 primeros.



Figura 11. Termorreactor utilizado para calentar las probetas para la medición de la DQO.

- **Medidor de DQO:** Una vez terminado el tiempo de espera, se introducen las probetas en un fotómetro adaptado para la medición de DQO (**Figura 12**), cuyo modelo es Fotómetro Spectroquant Nova 30a, de MERK, y se puede encontrar en diversas páginas de distribuidores como vidraFOC [27]. Este fotómetro detecta el tipo de kit que está siendo utilizado mediante un código QR, lo que le permite establecer distintas escalas según el utilizado. Una vez se ha realizado la medida, es importante devolver el kit a su caja y marcarlo como utilizado, ya que es un residuo peligros tanto para la salud como para el medioambiente, por lo que debe gestionarse adecuadamente.



Figura 12. Fotómetro para la medición de DQO.

Adicionalmente, también se utilizaron materiales de apoyo para el transporte y almacenamiento de sustancias, agitación, pesado... Entre estos se pueden destacar los siguientes:

- Baño térmico
- Vasos de precipitados de vidrio de 600 mL
- Placa agitadora magnética
- Imán
- Báscula
- Colador
- Micropipeta

4.3. Metodología de los ensayos de desodorización

En los ensayos se ha usado un volumen de líquido total de 500 mL y una masa de plástico de 5 g, para asegurar su correcta agitación (**Figura 13**). Con sistemas de agitación más potentes la relación plástico-líquido podría ser mayor con total seguridad. En cada tratamiento (agua, detergente, alcohol) se ha decidido variar la temperatura de la disolución (20, 40, 60°C), el tiempo de operación (5, 10, 15, 20 min) y la concentración (detergente, alcohol); para así observar los efectos de dichas variables de entrada sobre las características del agua residual resultante y sobre el olor de las muestras tratadas. Los valores estudiados de agua residual son los mencionados en el apartado anterior: pH, conductividad, turbidez y DQO, mientras que el olor de los plásticos se valorará en una escala cualitativa del 0 al 5, siendo 5 un olor igual de fuerte que el inicial y 0 la ausencia de olor.



Figura 13. Aspecto de una muestra de plástico en medio acuoso (5g/500mL).

4.3.1. Tratamiento con agua (T1)

El procedimiento seguido en este caso pasaba por las siguientes etapas:

1. Ajuste de temperatura del agua.
2. Adición de la masa de plástico y agitación durante el tiempo de estudio (**Figura 14**).
3. Filtración de la muestra y secado de los plásticos (**Figura 14**).
4. Caracterizar el filtrado: pH, conductividad, turbidez y DQO.
5. Tras dejar secar los plásticos durante un día a temperatura ambiente, se compara su olor con una muestra de plástico sin tratar.

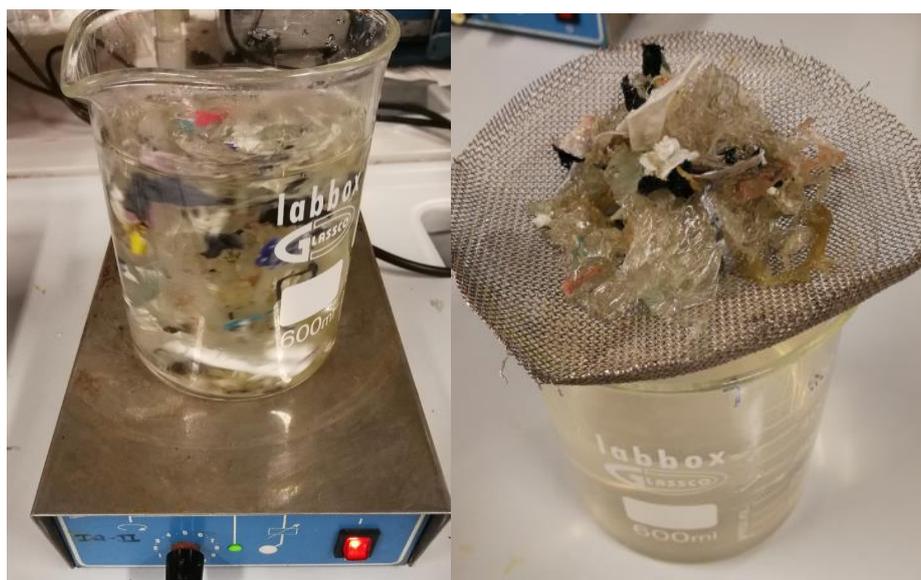


Figura 14. Etapa de agitación y filtración posterior del agua residual.

4.3.2. Tratamiento con detergente (T2)

El siguiente tratamiento que se ha probado, ha sido el uso de detergente comercial mezclado con agua (T2). Al igual que con el T1, se ha estudiado el mismo rango de tiempos y temperaturas, así como de cantidad de detergente con relación al volumen de agua. En cuanto a las proporciones plástico-líquido, se ha utilizado la misma obtenida anteriormente, 5 g en 500mL. Las concentraciones de detergente estudiadas han sido de un 1 y 2 % del volumen de agua utilizado.

El procedimiento seguido en este caso es muy similar al anterior, pero añadiendo un paso antes del secado que corresponde al lavado de los plásticos tratados:

1. Llevar el agua + detergente de concentraciones (0, 1 y 2 %) hasta la temperatura deseada.
2. Añadir la masa de plástico y agitar durante el tiempo de estudio.
3. Una vez terminado el tiempo de agitación, filtrar el agua residual.
4. Poner el plástico tratado bajo una corriente de agua para eliminar todo resto de detergente que pueda quedar (**Figura 15**) y poner a secar.
5. Caracterizar el filtrado: pH, conductividad, turbidez y DQO.
6. Tras dejar secar los plásticos durante varios días a temperatura ambiente, se compara su olor con una muestra sin tratar. El mayor tiempo de reposo se debe a que la muestra adquiere un fuerte olor a detergente tras el tratamiento a pesar del enjuague con agua, por lo que es necesario dejarlo airear.

En algunas experiencias, en el paso 4 se ha añadido un baño previo en agua caliente a 60°C para limpiar mejor de detergente el plástico, y así necesitar menos tiempo de secado.



Figura 15. Eliminación de restos del tratamiento mediante lavado.

4.3.3. Tratamiento con alcohol (T3)

Por último, se ha utilizado el alcohol para el tratamiento T3. El proceso base a seguir es idéntico al mencionado en el tratamiento con detergente.

1. Llevar el agua + alcohol de concentraciones 60, 80 y 100%, hasta la temperatura deseada.
2. Añadir la masa de plástico y agitar durante el tiempo de estudio.
3. Una vez terminado el tiempo de agitación, filtrar el agua residual.
4. Poner el plástico tratado bajo una corriente de agua para eliminar todo resto de alcohol que pueda quedar y poner a secar.
5. Caracterizar el filtrado: pH, conductividad, turbidez y DQO.
6. Tras dejar secar los plásticos durante varios días a temperatura ambiente, se compara su olor con una muestra sin tratar. Esto se debe a que, al igual que el detergente, el alcohol deja un fuerte olor residual. Sin embargo, el olor que deja el alcohol es más rápido de eliminar. De éste se elimina gran parte con el lavado posterior que se realiza con agua.

Al igual que en el T2, el paso 4 se ha combinado en ocasiones con un lavado en agua caliente antes de situarlo bajo la corriente de agua fría. En las etapas finales de este tratamiento, se combinó también como un lavado posterior de agua o detergente, siguiendo los pasos establecidos en sus respectivos apartados, para comprobar su efecto en el resultado final.

5. RESULTADOS EXPERIMENTALES

A continuación, se detallan los resultados obtenidos para los tres tratamientos anteriormente expuestos. Las variables representadas son las mencionadas en el apartado anterior, y se representan mediante las gráficas creadas con la herramienta de diseño de experimentos de Statgraphics. El objetivo de utilizar una herramienta estadística es determinar qué variables influyen de forma más determinante en los tratamientos aplicados. Para realizar el diseño de experimentos se establecieron como variables de entrada el tiempo, la concentración y la temperatura, y como variables de salida, el pH, la turbidez, la conductividad, la DQO y el olor. Las figuras que se muestran contienen una representación de los efectos principales y una superficie de respuesta, para poder estimar los valores de cada variable de salida en función de las de entrada y la variación que supondría cada una en el resultado final.

5.1. Resultados del tratamiento con agua

Como se observa en la **Figura 16**, el color del agua apenas cambia, al igual que los distintos valores medidos. Además, tras el secado de los plásticos, se puede comprobar que el olor de estos no ha disminuido, lo que elimina por completo el utilizar solo agua.

A continuación, se muestran algunas gráficas (**Figuras 18-25**) de los efectos del tiempo y la temperatura en los valores del agua residual. En ellas se puede observar como los mayores cambios se producen a los valores de tiempo y temperatura más altos.

No se ha observado ningún cambio significativo en el olor, por lo que se ha optado por no graficar olor en función de los parámetros de entrada, ya que se ha mantenido prácticamente al máximo tras todas las variantes del tratamiento.



Figura 16. Aguas residuales a 40°C durante 10, 15 y 20 minutos respectivamente, T1.

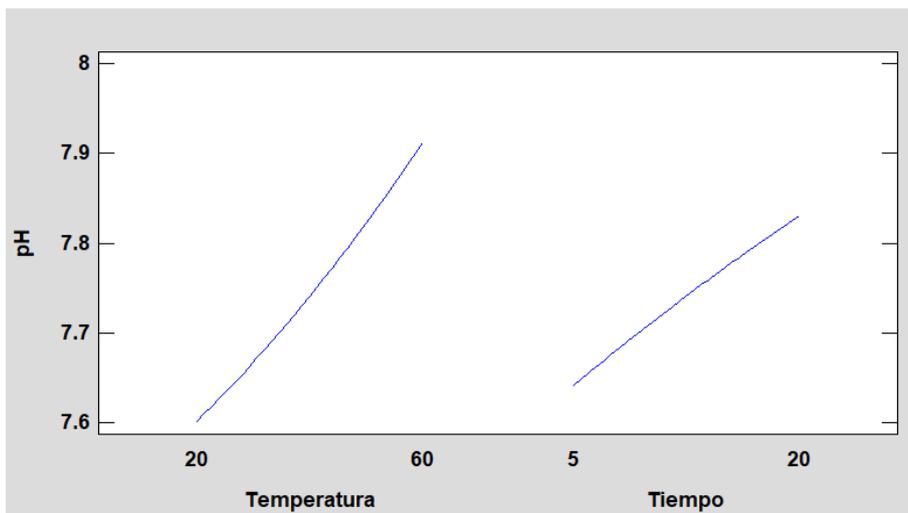


Figura 17. Relación entre el pH y temperatura y tiempo (T1).

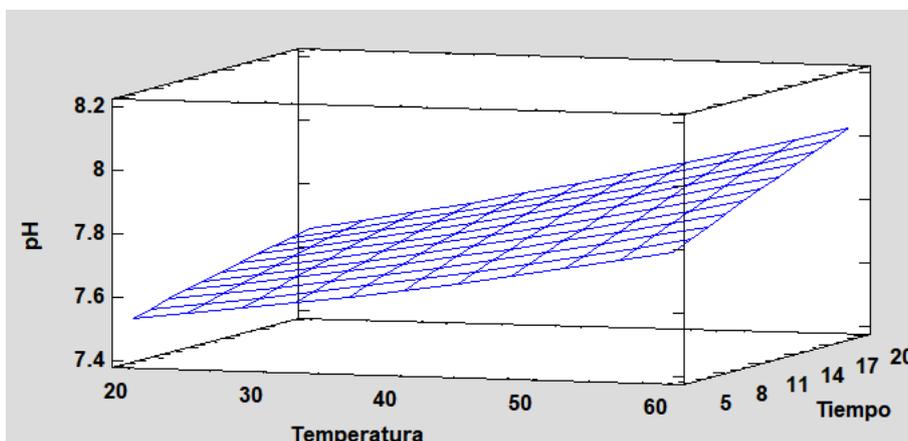


Figura 18. Superficie de Respuesta Estimada para el pH según la temperatura y tiempo (T1).

Se puede observar que la tendencia del pH es a aumentar cuanto más tiempo y a mayor temperatura se traten las muestras. Esto se puede deber a la extracción de algún contaminante presente en los plásticos. Sin embargo, también cabe destacar que el aumento del pH es poco significativo y se mantiene dentro de los valores reflejados en la **Tabla 1**.

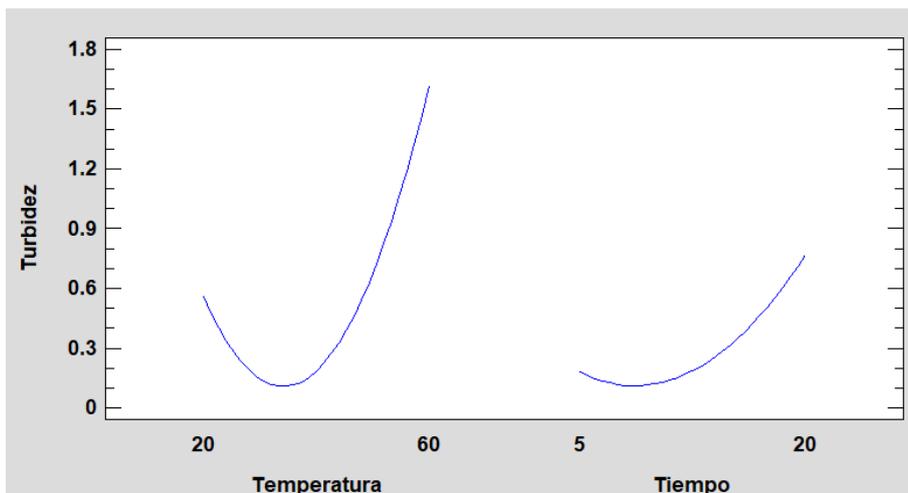


Figura 19. Relación entre la turbidez y temperatura y tiempo (T1).

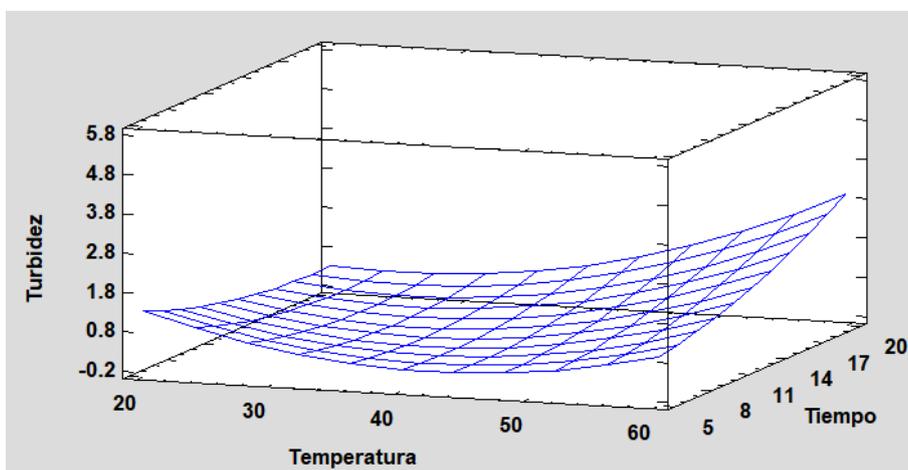


Figura 20. Superficie de Respuesta Estimada para la turbidez según la temperatura y tiempo (T1).

Al igual que en el caso del pH, los valores máximos de turbidez se presentan a valores altos de tiempo y temperatura, lo que indica que la eliminación de la suciedad y/o los posibles contaminantes es mayor con estas condiciones.

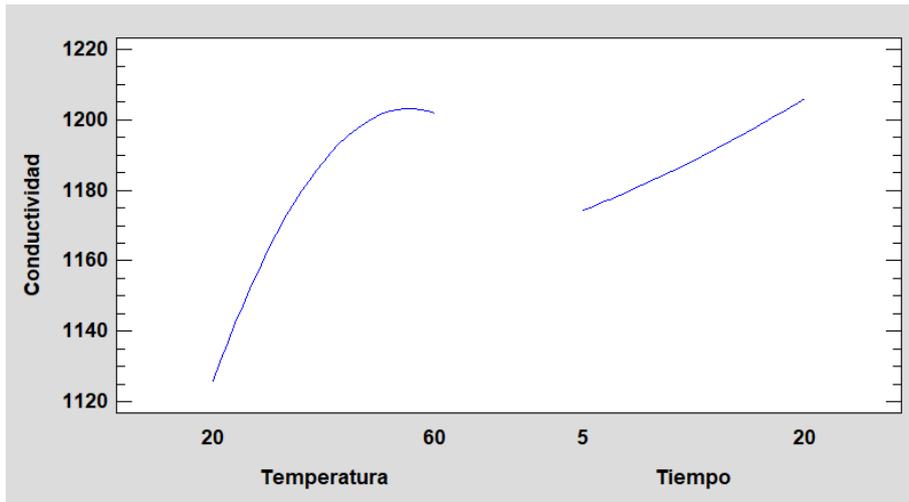


Figura 21. Relación entre la conductividad y temperatura y tiempo (T1).

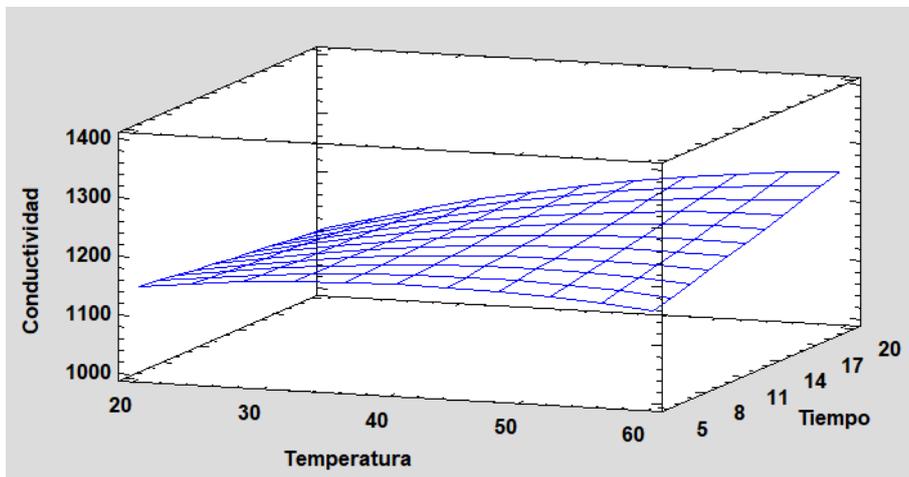


Figura 22. Superficie de Respuesta Estimada para la conductividad según temperatura y tiempo (T1).

Como con las otras dos variables, los valores más altos de conductividad coinciden con los más altos de tiempo y temperatura. Sin embargo, se puede comprobar como a partir de una cierta temperatura (53°C), la conductividad alcanza una asíntota, no llegando a superar en ningún momento el límite establecido por ley de 5000 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

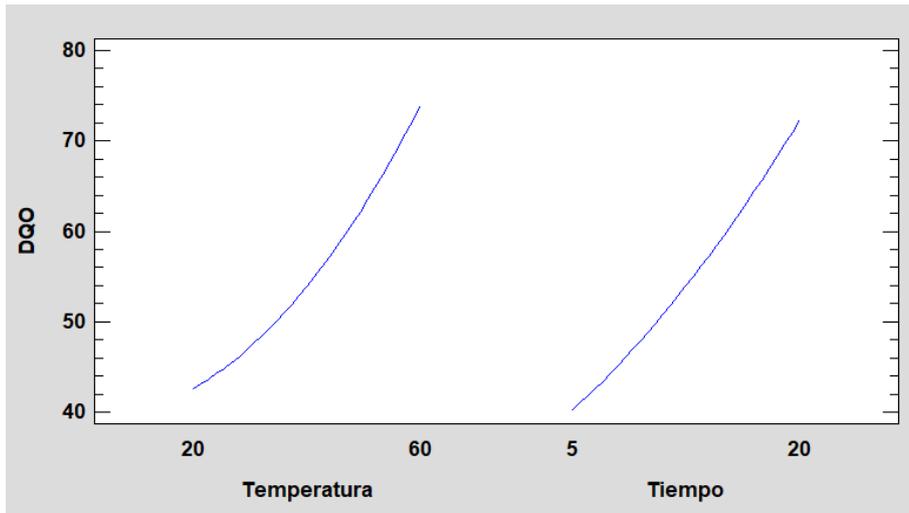


Figura 23. Relación entre la DQO y temperatura y tiempo (T1).

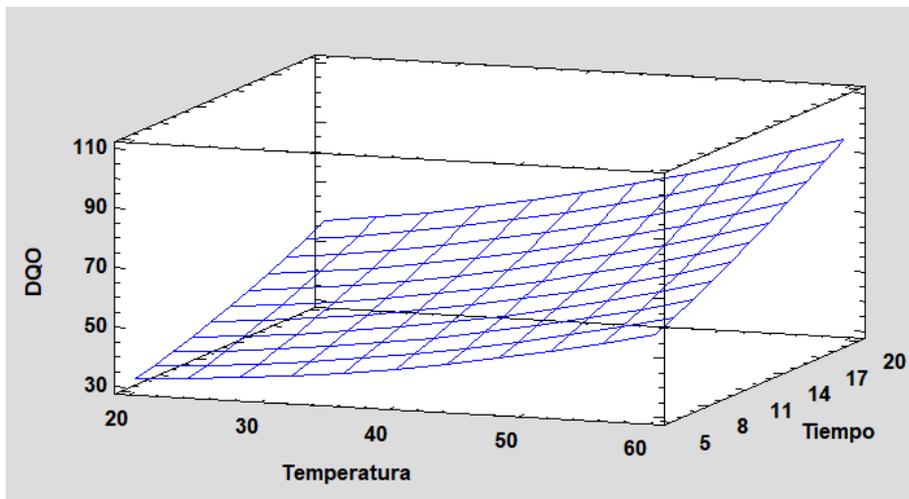


Figura 24. Superficie de Respuesta Estimada para la DQO según la temperatura y tiempo (T1).

Los valores de DQO mantienen la tendencia del resto de parámetros, obtiene valores superiores cuanto más tiempo y temperatura. Sin embargo, es importante destacar que a pesar de que no son valores alarmantes ya que se mantienen dentro de los límites legales, el aumento es significativo, lo que indica que el agua está absorbiendo contaminantes del plástico.

5.2. Resultados del tratamiento con detergente

Seguidamente se muestran los resultados obtenidos a lo largo de las experiencias de tratamiento con detergente. Durante los primeros días tras el tratamiento, el plástico desprende un fuerte olor a detergente. Tras pasar el tiempo y varios lavados con agua, se consigue eliminar los rastros de olor al detergente, y se obtiene una muestra de plástico con un olor ligeramente menos desagradable que el inicial, pero claramente presente.



Figura 25. Muestra de detergente de concentración 2% tratado a 20°C durante 20 minutos.

En la **Figura 25** se puede ver la mezcla agua-detergente antes del tratamiento y después de éste. Se puede observar que el color se ha oscurecido notablemente, debido a la suciedad acumulada en las muestras. Otro factor a destacar es la elevada DQO que tiene el detergente de por sí, antes siquiera de añadir el plástico.

Al igual que se ha hecho anteriormente, se muestran gráficas (**Figuras 27-36**) que detallan la relación entre los distintos parámetros medidos y las condiciones iniciales.

Si consideramos el olor nada más acabar el tratamiento, el olor se quedaría en el máximo valor establecido, ya que el olor del detergente que enmascara los olores desagradables también es muy fuerte. Por ello se ha tenido en cuenta el olor tras el proceso de lavado y secado a temperatura ambiente.

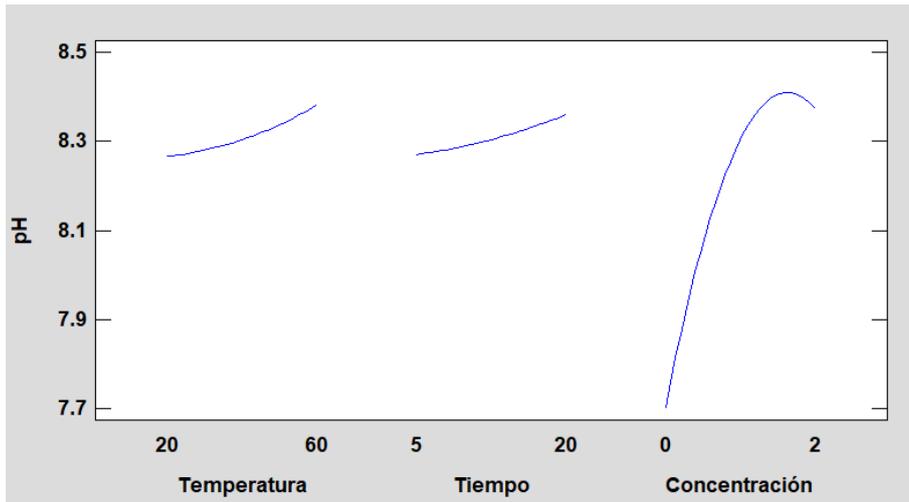


Figura 26. Relación entre pH y temperatura, tiempo y concentración (T2).

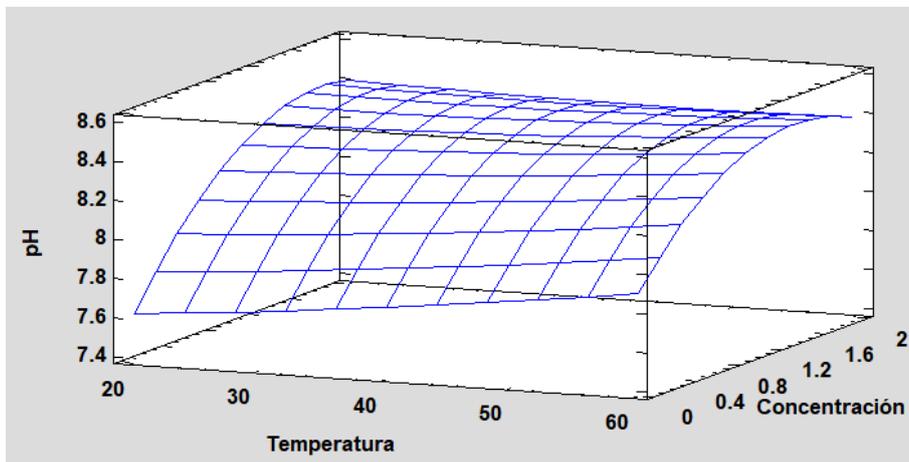


Figura 27. Superficie de Respuesta Estimada para el pH según temperatura y concentración, a tiempo constante (T2).

Como se puede observar, la concentración es el factor a tener más en cuenta en la variación del pH, seguido de la temperatura y el tiempo. Al ser este último el menos influyente, la superficie de respuesta estimada se ha hecho manteniendo éste constante. Los valores de pH, aunque casi al límite, se mantienen dentro de lo establecido por la normativa.

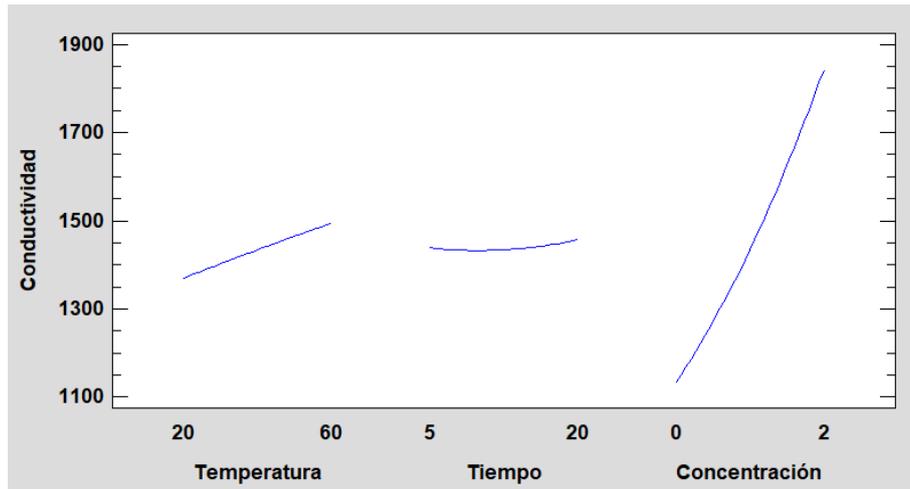


Figura 28. Relación entre conductividad y temperatura, tiempo y concentración (T2).

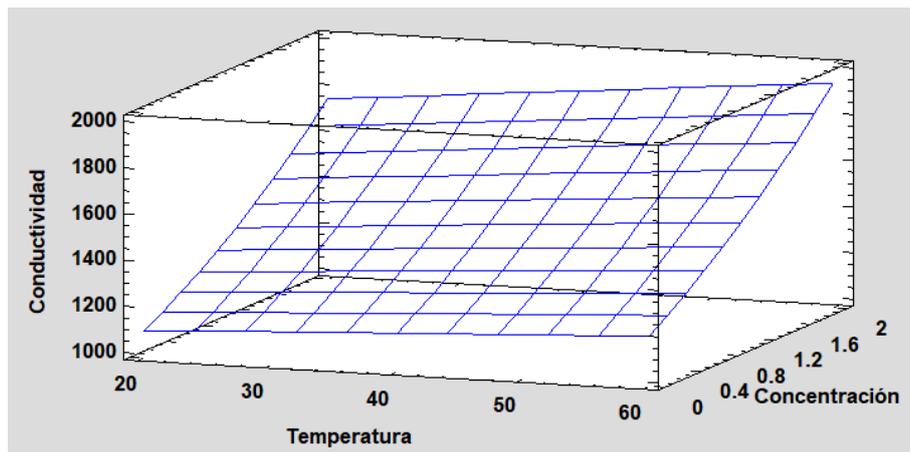


Figura 29. Superficie de Respuesta Estimada para la conductividad según temperatura y concentración, a tiempo constante (T2).

Al igual que en el caso anterior, la variable más importante que modifica la conductividad es la concentración. En este caso la temperatura tiene una ligeramente mayor importancia que en caso del pH, mientras que el tiempo es prácticamente irrelevante, por lo que se ha mantenido constante para dibujar la superficie de respuesta. De nuevo, la conductividad no presenta problemas en cuanto al vertido de las aguas residuales, ya que se mantiene por debajo del valor máximo.

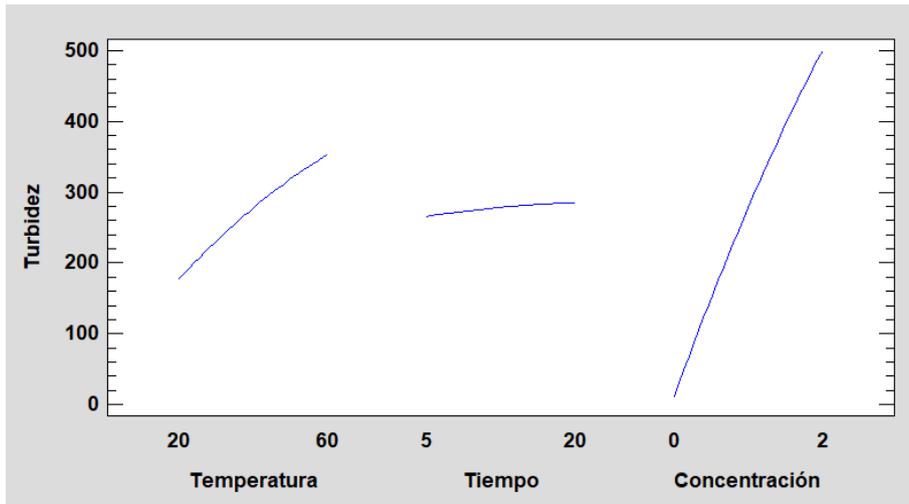


Figura 30. Relación entre turbidez y temperatura, tiempo y concentración (T2).

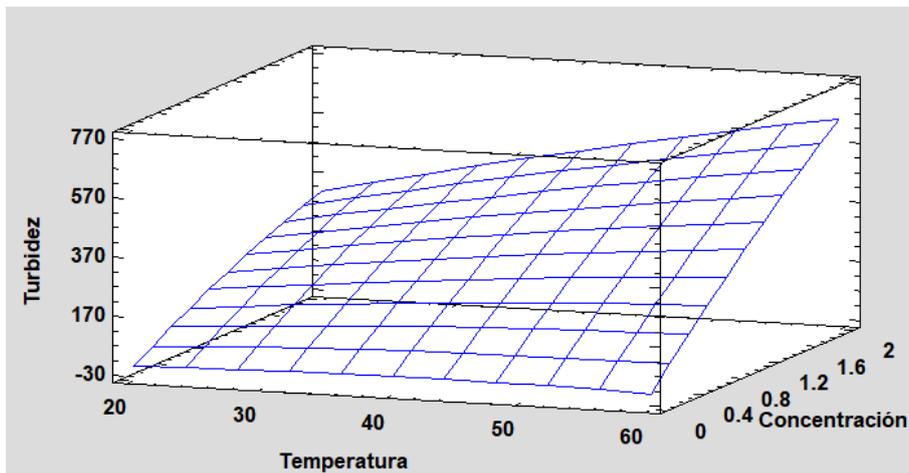


Figura 31. Superficie de Respuesta Estimada para la turbidez según la temperatura y concentración, a tiempo constante (T2).

Como en el caso anterior, el valor de la turbidez es mayor cuanto más aumenta la temperatura y la concentración, siendo el efecto del tiempo prácticamente inapreciable.

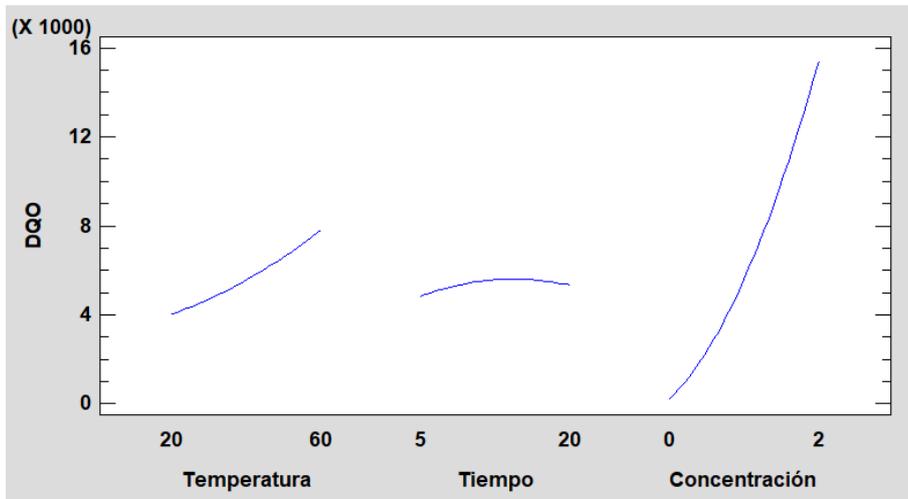


Figura 32. Relación entre DQO y temperatura, tiempo y concentración (T2).

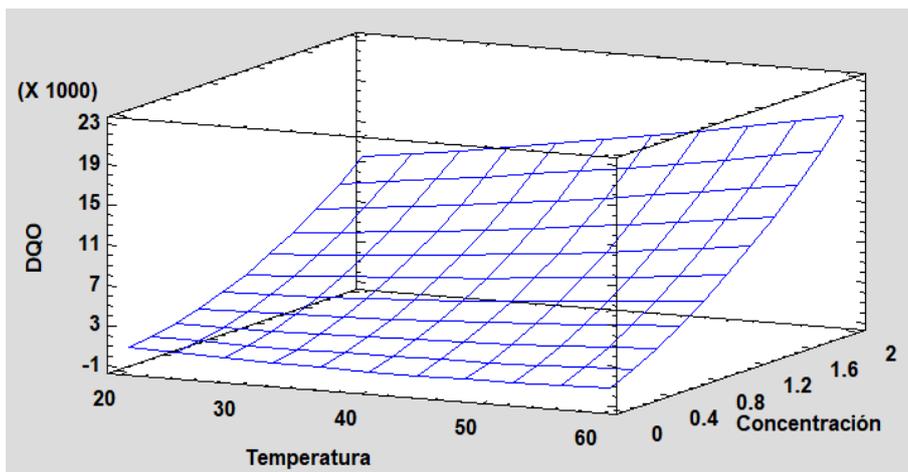


Figura 33. Superficie de Respuesta Estimada para la DQO según la temperatura y concentración, a tiempo constante (T2).

Al igual que con el resto de los parámetros, la DQO tiende a aumentar con la temperatura y la concentración, siendo este último parámetro el más influyente. En este caso, el valor máximo que se encuentra reglado es de 1500 mg/L, el cual se supera con creces en algunas condiciones de trabajo, por lo que las aguas resultantes no podrían ser vertidas directamente y necesitarían tratamiento.

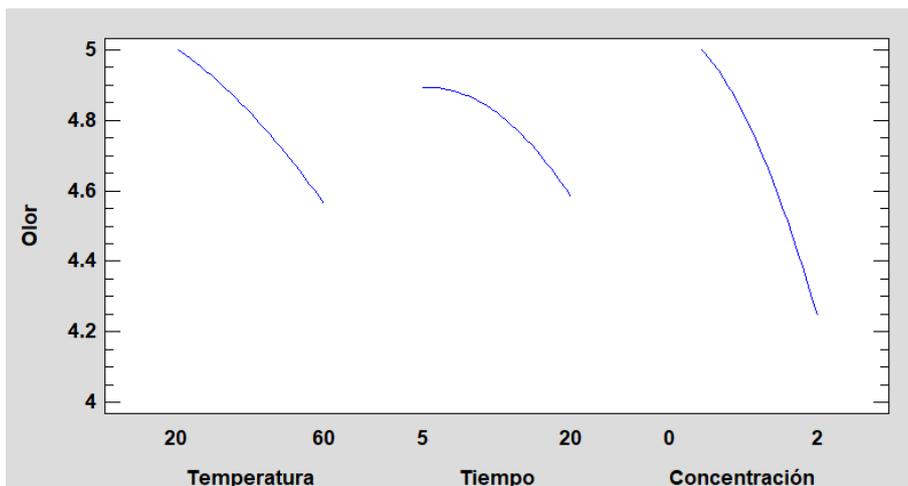


Figura 34. Relación entre olor y temperatura, tiempo y concentración (T2).

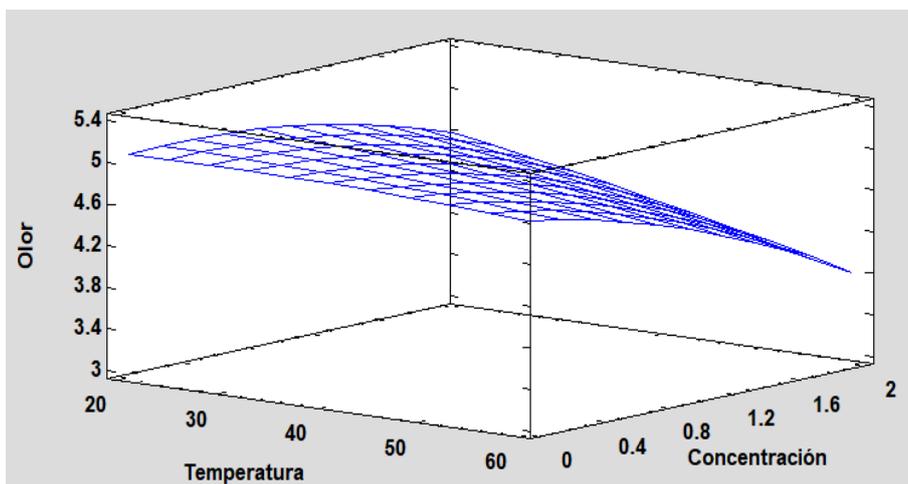


Figura 35. Superficie de Respuesta Estimada para la DQO según la temperatura y concentración, a tiempo constante (T2).

En el caso del olor, el tiempo pasa a ser una variable más significativa que en el resto de las variables, pero la superficie se ha trabajado a valores de tiempos constantes por ser la menos importante. Como se observa, los valores más altos de concentración y temperatura son los que proporcionan menores valores de olor, resultando en un tratamiento más efectivo.

5.3. Resultados del tratamiento con alcohol

Por último, se presentan los resultados del tratamiento con alcohol (**Figura 36**). Como características generales de las experiencias, cabe destacar que el éter metílico de dipropilenglicol es menos denso que el agua, lo que facilita la agitación de los plásticos, al no quedar estos en la superficie y mezclarse mejor con el líquido. También es destacable el hecho de que, a mayor porcentaje de alcohol, menos color adquiere la corriente residual final, debido a una menor presencia de agua. Es importante mencionar que los valores de DQO de la mezcla residuo son muchísimo más altos que los correspondientes al detergente, sin embargo, también lo es la cantidad de olor eliminado, otorgando muy buenos resultados.

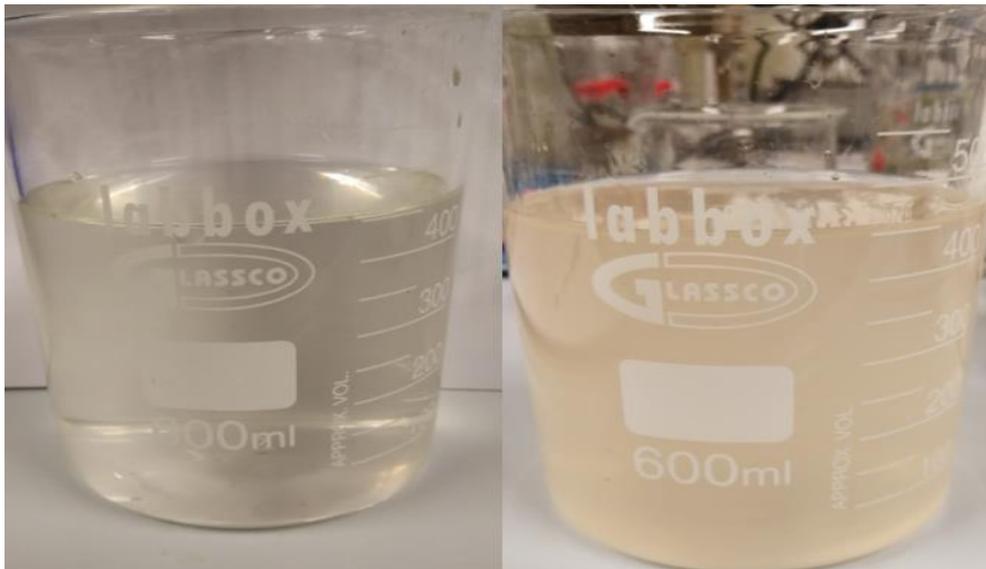


Figura 36. Alcohol al 60% y 18°C, antes y después del tratamiento durante 20 minutos.

Otro aspecto a destacar es que tras las primeras experiencias con este tratamiento, se decidió comprobar si un lavado con agua o detergente anterior a sumergirlo en alcohol mejoraba los resultados finales. Con respecto a ambos, los resultados no eran apreciables y, además, en el caso del detergente dejaba un fuerte olor residual que implicaba más tiempo de secado para obtener unos resultados nada diferenciados. Por ello, la decisión final fue incluir un lavado rápido al inicio con agua, no por obtener un mejor efecto en la eliminación de olor, si no para limpiar la mayor cantidad de suciedad presente inicialmente en las muestras, ya que, al provenir directamente de depósitos y contenedores, la probabilidad de presentar polvo y otras sustancias fáciles de eliminar con agua es muy alta. Lo que sí se tuvo en cuenta es que un lavado con agua caliente (60°C) tras sacar el plástico del alcohol ayudaba a eliminar más rápido el olor residual de éste, lo que disminuiría los tiempos de secado de la muestra.

A continuación se muestran los resultados graficados en las **Figuras 38-49**.

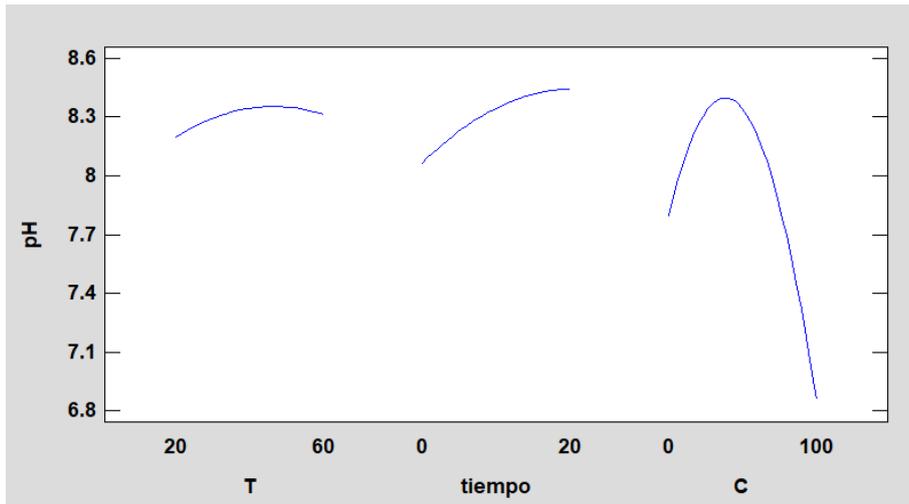


Figura 37. Relación entre pH y temperatura, tiempo y concentración (T3).

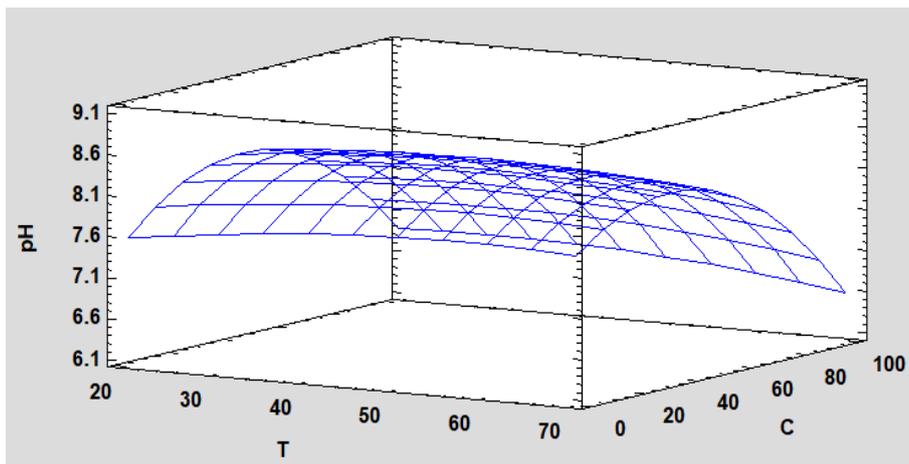


Figura 38. Superficie de Respuesta Estimada para el pH según la temperatura y concentración, a tiempo constante (T3).

Se puede comprobar como la temperatura y el tiempo de tratamiento no tienen una gran influencia en el valor del pH, mientras que aumenta a medida que las concentraciones de agua y alcohol se equiparan, y disminuye cuando una de las dos sustancias predomina. A valores porcentuales de concentración similares sería necesario hacer un control del pH, ya que los valores obtenidos en esas condiciones, a pesar de encontrarse por debajo, están cerca de rebasar el máximo permitido.

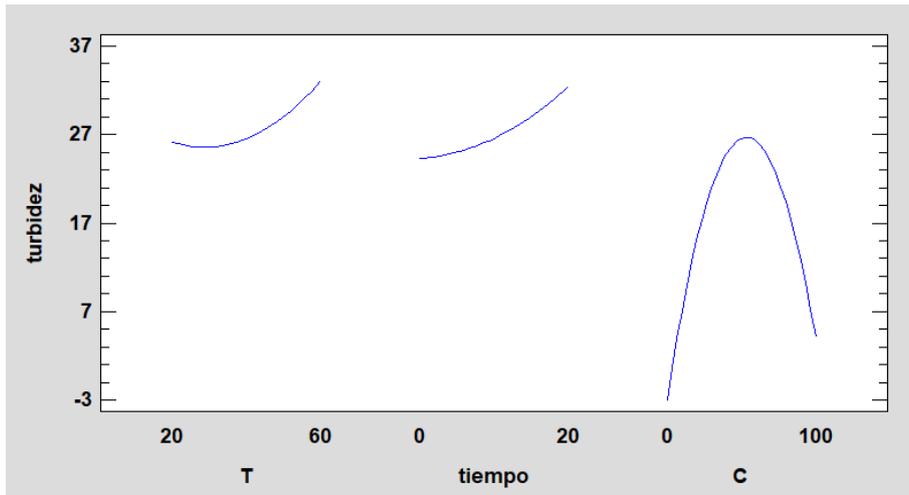


Figura 39. Relación entre turbidez y temperatura, tiempo y concentración (T3).

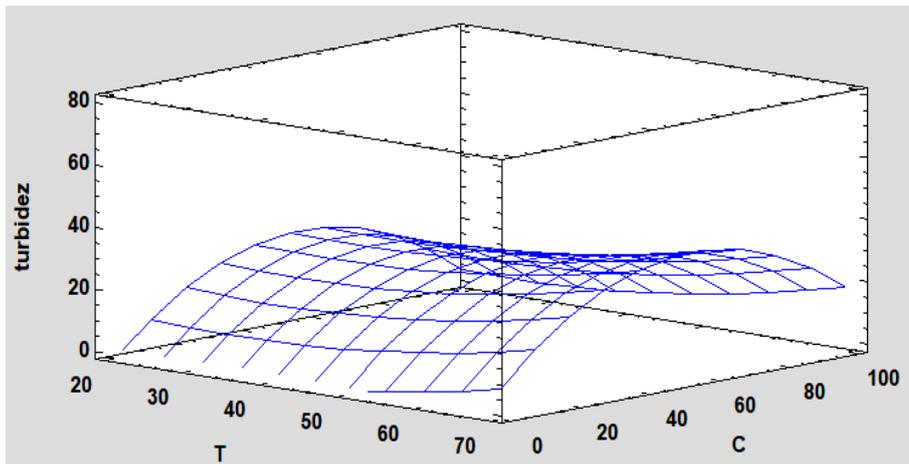


Figura 40. Superficie de Respuesta Estimada para la turbidez según la temperatura y concentración, a tiempo constante (T3).

Al igual que en el caso del pH, la variable más significativa es la concentración, enturbiando más la mezcla cuando las concentraciones son similares. Sin embargo, en este caso la temperatura y el tiempo tienen un efecto ligeramente mayor, aumentando la turbidez con su crecimiento.

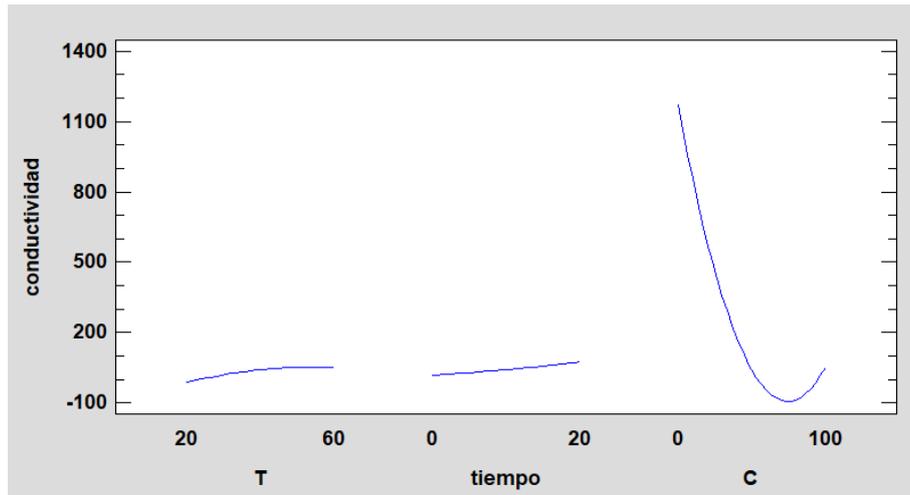


Figura 41. Relación entre conductividad y temperatura, tiempo y concentración (T3).

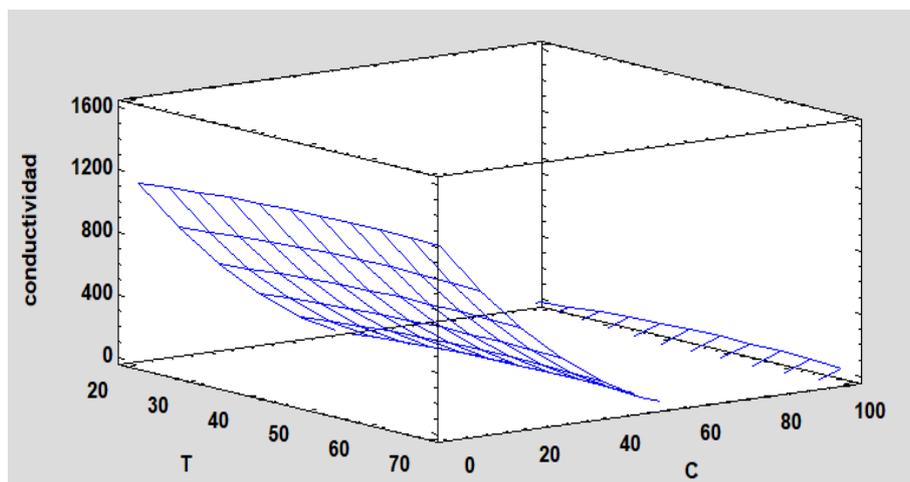


Figura 42. Superficie de Respuesta Estimada para la conductividad según la temperatura y concentración, a tiempo constante (T3).

Una vez más, los efectos del tiempo y la temperatura son irrisorios comparados con los de la concentración, la cual hace disminuir la conductividad a medida que crece. En la figura 32 se puede ver como la superficie graficada desaparece en el intervalo entre 50 y 90 % de concentración. Esto significa que los valores que ahí se representan son negativos, lo cual no es posible, por lo que se puede suponer que simplemente serían muy cercanos a 0. En la legislación no aparece ninguna limitación inferior para el parámetro de conductividad, y no supera el superior, por lo que estos valores no requerirían ningún tratamiento adicional.

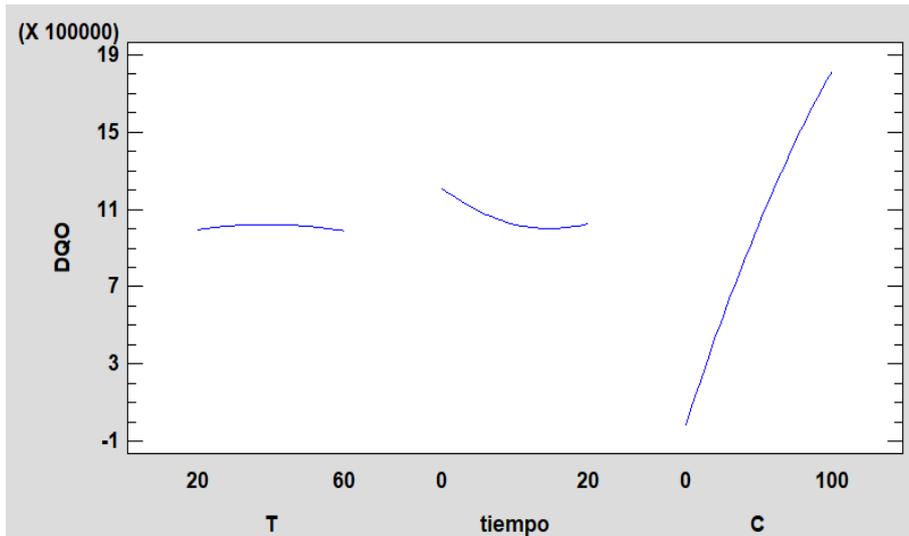


Figura 43. Relación entre DQO y temperatura, tiempo y concentración (T3).

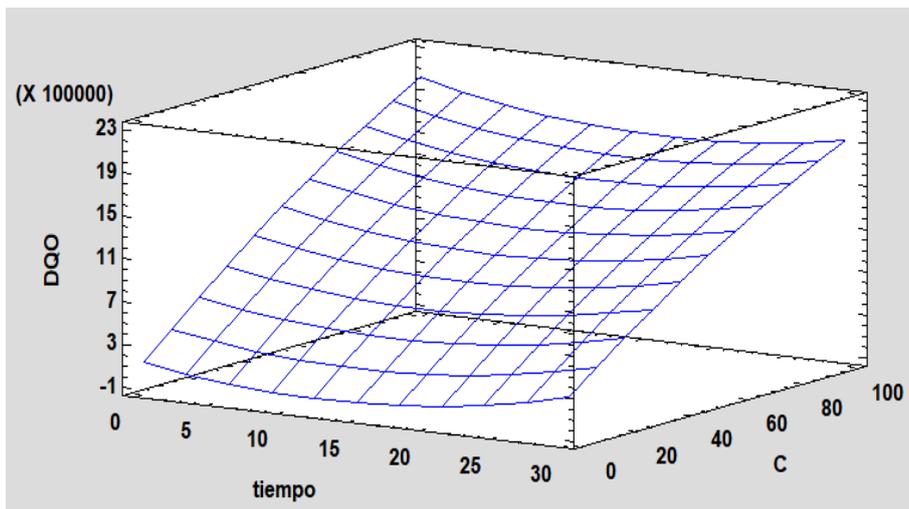


Figura 44. Superficie de Respuesta Estimada para la DQO según tiempo y concentración, a temperatura constante (T3).

En el caso de la DQO, los valores se han reportado muy altos para cualquier condición. Bien se puede comprobar que este valor aumenta con la concentración notablemente, por lo que sería un factor a tener muy en cuenta a la hora de valorar un tratamiento de aguas residuales.

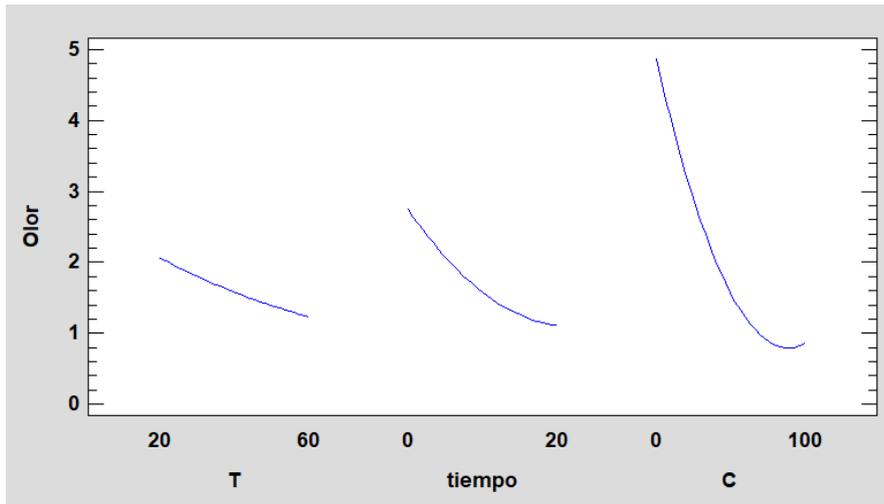


Figura 45. Relación entre olor y temperatura, tiempo y concentración (T3).

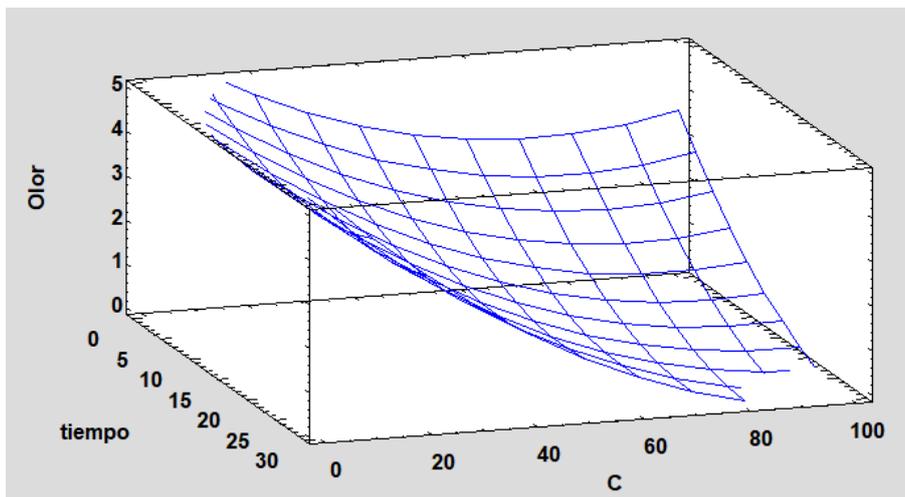


Figura 46. Superficie de Respuesta Estimada para el olor según tiempo y concentración, a temperatura de 20°C (T3).

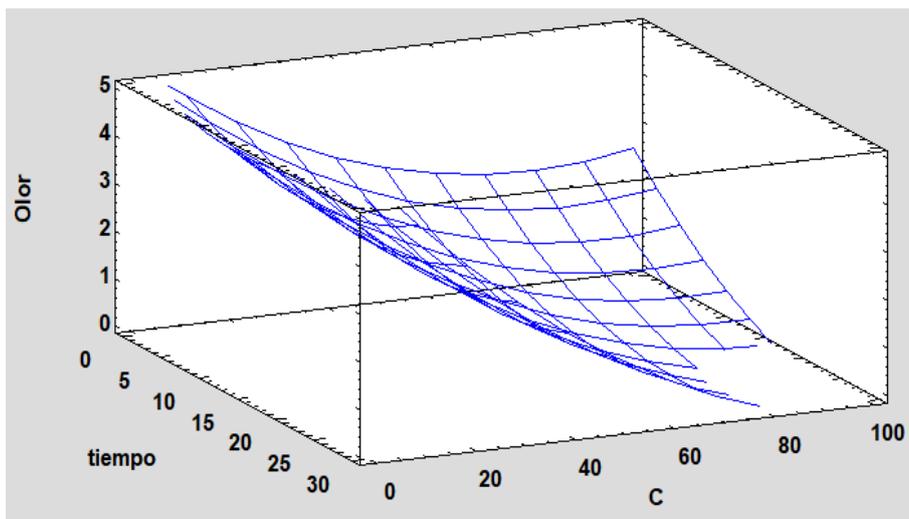


Figura 47. Superficie de Respuesta Estimada para el olor según tiempo y concentración, a temperatura de 40°C (T3).

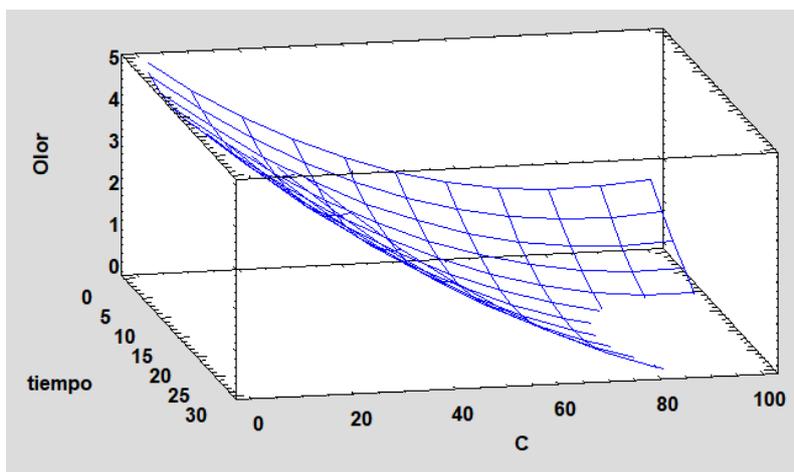


Figura 48. Superficie de Respuesta Estimada para el olor según tiempo y concentración, a temperatura de 60°C (T3).

Ya que el olor es la característica principal a estudiar durante el experimento y la variabilidad de este es muy grande dependiendo de las diferentes condiciones del tratamiento, se han representado tres superficies estimadas, una por cada temperatura utilizada durante esta fase. Otro criterio para haber elegido la temperatura como constante de representación es que es la que menor efecto tiene en el resultado final, como se puede comprobar en la **Figura 45**. Como era de esperar, los mejores resultados se muestran a concentraciones y tiempos más altos, en los que podemos encontrar zonas de olor 0, las cuales son mayores cuanto mayor es la temperatura.

Con estos resultados se interpreta que pueden existir distintas soluciones al problema de eliminación del olor. El valor límite de dicho olor variaría según la finalidad del plástico reciclado, pero para este estudio se ha considerado aceptable todo olor por debajo de 0,3. Para delimitar los valores a estudiar, se han cogido los valores de superficie límite antes de que se reduzca a 0, para permitir un pequeño margen de error hasta el 0,3. Con esto se obtienen seis condiciones de trabajo diferentes, las

cuales se recogen en la **Tabla 2** y se evaluarán económicamente en un apartado posterior para seleccionar el más adecuado. Estas condiciones son:

Tabla 2. Condiciones óptimas para la eliminación de olor.

	Temperatura (°C)	Concentración (%)	Tiempo (min)
1	20	80	30
2	20	100	22
3	40	100	16
4	40	80	27
5	60	100	11
6	60	70	20

6. CONCLUSIONES DE LA PARTE EXPERIMENTAL Y EL ESTUDIO ESTADÍSTICO

- La cantidad de muestra utilizada en cada ensayo estaba limitada por la herramienta de agitación, que no funcionaba correctamente con una masa de muestra mayor al 1% del volumen de líquido, pero que podría aumentarse con total seguridad en caso de utilizar un dispositivo de mayor potencia, como unas palas.
- Se han ensayado tres tipos de tratamiento con tres productos diferentes: agua de red, detergente y éter metílico de dipropilenglicol. En todos los casos, los ensayos se han realizado por triplicado para hacer un estudio estadístico y asegurar el buen funcionamiento del modelo de predicción establecido por Statgraphics.
- El proceso seleccionado consiste en un lavado inicial con agua a 20°C para la eliminación de toda la posible suciedad superficial que se pueda encontrar, seguido de un secado de las muestras para eliminar el agua restante. A continuación, la muestra entra a un baño de alcohol a una de las condiciones óptimas que se han obtenido, y, al terminar el tiempo de agitación establecido en las condiciones, se retira el plástico del alcohol mediante un proceso de filtración y se introduce en un baño de agua durante 10 minutos, a una temperatura entre 40-60°C, dependiendo de la temperatura del baño de alcohol anterior. Por último, se escurre la muestra y se deja secar a temperatura ambiente durante al menos 1 día.
- La caracterización del agua residual resultado de poner en contacto la muestra de plástico con alcohol hace evidente la necesidad del tratamiento de la misma, ya que, a pesar de otorgar unos valores de conductividad y turbidez válidos, el pH se encuentra al límite del máximo marcado por la normativa y la DQO presenta valores muy por encima de lo permitido.

7. DISEÑO DE LA INSTALACIÓN

Para diseñar la instalación, se ha escalado el proceso llevado a cabo durante las experiencias en el laboratorio hasta tamaño industrial. Se han dimensionado los equipos necesarios en las diferentes etapas y se han obtenido los distintos parámetros que los caracterizan. Posteriormente, se utilizarán dichos parámetros para realizar una breve evaluación económica de cada una de las condiciones señaladas en la **Tabla 2**, con el objetivo de encontrar la mejor, para realizar un estudio económico más completo en el apartado 8. Para los cálculos de diseño realizados se ha contado con el apoyo de la herramienta de cálculo CheCalc [28].

En primer lugar, cabe comentar que la instalación trabajará en discontinuo. Para ello, en función de las necesidades, se introducirán cargas de residuo plástico que serán tratadas con el fin de eliminar el olor. Una vez tratada cada carga, y en caso necesario, se procederá a la introducción de una nueva carga de residuo.

La instalación diseñada cuenta con los siguientes equipos: un tanque de mezcla (disolución + plástico), una pieza cilíndrica para transportar el plástico triturado, una grúa que permita desplazar el cilindro, un sistema de ducha, un depósito de recolección para el agua de la ducha y una caldera. Además, durante el proceso, es necesario controlar diversos parámetros, como temperatura o presión, por lo que se deben instalar los instrumentos requeridos para ello, así como bombas y válvulas para el movimiento de los fluidos y un agitador portátil para el tanque. En caso de que las condiciones de trabajo más favorables requieran un aumento de la temperatura de la mezcla de alcohol, será necesario instalar una camisa calefactora en el tanque, así como un aislante para evitar quemaduras en el operario y disminuir las pérdidas de calor.

El volumen de operación será de 1 m³ de fluido, ya que se pretende utilizar una relación líquido-sólido 5 veces mayor de la utilizada a escala laboratorio. Como se ha mencionado antes, a nivel de laboratorio, se trataban 5 g de plástico con 500 mL de líquido, ya que los métodos de agitación no permitían añadir una masa de plástico mayor. Sin embargo, se hizo evidente que incluso mediante agitación manual, la cantidad de plástico que se podía utilizar era mayor, por lo que con un agitación industrial se podría aumentar fácilmente la relación. Es por esto que se utilizará una relación de 5 g por cada 100 mL de líquido. Esta relación ha sido estimada, pero con un estudio más profundo sobre las condiciones de agitación se podría establecer con mayor precisión. Por tanto, en la escala de trabajo real, la planta se diseña para tratar 50 kg con 1 m³, que es la masa de plástico estimada a tratar diariamente.

El proceso constará de las siguientes etapas:

1. Carga del residuo plástico: colocación del filtro en el cilindro y llenado del mismo con el plástico triturado mediante la tolva. Acople a la grúa.
2. Lavado 1 con agua: transporte del cilindro hasta la zona de lavado (ducha), inicio de la caída de agua para la eliminación de suciedad superficial contenida en los plásticos durante 5 minutos.
3. Escurrido 1: Se dejará gotear el agua sobrante durante 5 minutos. Toda el agua residual caerá en un depósito abierto situado bajo la ducha.

4. Tratamiento con alcohol: una vez transcurridos los cinco minutos, se transportará el cilindro hasta el tanque, donde se realizará el tratamiento con alcohol. Estando el cilindro establecido en el interior del tanque, se desacoplará de la grúa, se colocará el agitador en posición y se comenzará el llenado del tanque. Una vez completo el llenado, se pondrá en marcha la agitación y la calefacción de la camisa en caso de ser necesario. Cuando se alcance la temperatura deseada, se continuará la agitación durante el tiempo establecido mientras que un controlador se encarga de mantener la temperatura constante mediante el control del caudal de calefacción. Al terminar el tiempo de agitación, ésta se detendrá y retirará, y se hará apertura de la válvula inferior del tanque, por donde se evacuará todo el líquido contaminado y se tratará en la misma planta para su reutilización.
5. Lavado 2 con agua: una vez completado el vaciado, se realizará de nuevo el acople del cilindro a la grúa y se transportará de nuevo a la zona de lavado (ducha), donde se realizará otro lavado durante 5 minutos. Mientras transcurre la ducha, se procederá a la limpieza del tanque mediante la introducción de agua.
6. Esgurrido 2: Se dejará gotear el agua sobrante durante 5 minutos. Toda el agua residual caerá en el depósito abierto situado bajo la ducha.
7. Tratamiento con agua caliente: finalizada la ducha, el cilindro se desplazará de nuevo hasta el tanque, donde se colocará siguiendo las indicaciones del paso 4 para un baño de agua caliente a 60°C durante 10 minutos. Al terminar el tiempo de agitación, se extrae del tanque el agitador, el cilindro y se procede al vaciado del líquido contaminado. El líquido contaminado se evacuará hasta un depósito para su gestión posterior.
8. Secado del residuo plástico: por último, el plástico se almacenará en una cámara con aire seco, buena ventilación y una temperatura entre 20 y 40°C para su secado, el cual durará 2 días y no necesita supervisión.

En el **Plano 1**, se muestra un diagrama de flujo, el cual se puede consultar para una mejor comprensión del proceso.

7.1. Diseño del cilindro móvil

A la hora de diseñar un proceso para el tratamiento, una de las dificultades que surgen con más rapidez es el trabajo con sólidos, más aún cuando el sólido no es el residuo, sino que es el producto objetivo. Por ello era necesario crear un diseño que permitiese un transporte sencillo de los sólidos una vez tratados. Como solución, se ha decidido utilizar un cilindro hueco hecho de acero inoxidable, con un fondo agujereado sobre el que se sitúa un filtro. Dicho filtro puede estar hecho de diversos materiales, el elegido se trata de un papel de filtro de celulosa con resistencia a la humedad y a las altas temperaturas. Su diámetro será el mismo que el del cilindro, y su espesor de 25 μm . Se pueden encontrar filtros de este tipo (**Figura 49**) en la web de [Dorsan Filtration](#) [29]. Sobre este filtro se colocarán los residuos plásticos. En la parte superior, el cilindro contará con cuatro anillas, las cuales harán el trabajo de superficie de enganche para el transporte en grúa. Las medidas del cilindro se detallan en la **Tabla 3**.

Tal y como se menciona anteriormente, se ha decidido usar un volumen de operación de 1 m^3 , por lo que, para asegurar que el plástico y la agitación no causen desbordamientos, se buscará un volumen próximo a $1,5 \text{ m}^3$, manteniendo un margen de seguridad de aproximadamente el 20%, suponiendo que el plástico aumente el volumen hasta $0,2 \text{ m}^3$.



Figura 49. Filtro de celulosa.

El diámetro (ϕ) que se utilizará será de 1 m, por lo que una vez fijados volumen (V) y diámetro, se puede obtener la altura (h), despejando el término de la **Ec. 1**. Con ello se obtiene una altura de 1,9 m, la cual se aumentará hasta 2 m para facilitar los cálculos y el diseño, dejando así un volumen de $1,57 \text{ m}^3$.

$$V = h \times \frac{\phi^2}{4} \times \pi = h \times \frac{1^2}{4} \times \pi = 1,5 \text{ m}^3 \quad (\text{Ec. 1})$$

El espesor de la pared y el diámetro de los agujeros han sido seleccionados arbitrariamente, aunque se ha procurado que los agujeros no dejasen pasar los trozos de plástico en caso de fuga. Las diferentes vistas se muestran en el **Plano 2**, y una vista isométrica de una sección en la **Figura 50**.

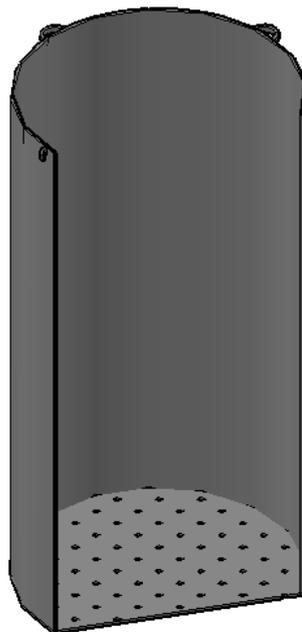


Figura 50. Vista de sección del cilindro.

Tabla 3. Medidas del cilindro.

Parámetro	Medida
Altura	2 m
Diámetro	1 m
Espesor	10 mm
Diámetro agujeros	10 mm
Volumen total	1,57 m ³

7.2. Diseño del tanque

El diseño elegido consta de un tanque cilíndrico con fondo cónico, que cuenta con dos barras colocadas en forma de cruz en la unión entre el cilindro y el cono. Dichas barras cumplen con la función de sujetar el cilindro que se utilizará para mover el plástico. Para permitir el fácil acople del cilindro, el diámetro del tanque será 10 cm mayor, lo que dejará un margen por ambos lados. Además, cuenta con una salida de líquido en el fondo regulada mediante una válvula. El material con el que se construirá será acero inoxidable, y el espesor de 10 mm.

Dado que es importante que el operario pueda acceder, tanto física como visualmente a la parte superior del tanque donde se situará el cilindro, se colocará una base de escaleras de piedra entorno al tanque, con una altura total de 1 m y un desagüe en el fondo, funcionando como salida de emergencia del fluido en caso de escape. Por ello, las paredes internas del muro estarán cubiertas de plástico aislante, para evitar que el fluido traspase a través de la piedra.

Es importante que la altura del tanque sea inferior a la del cilindro, para evitar que plástico flotando caiga hasta la base cónica y cause problemas en la válvula y las conducciones. Por ello se ha establecido una altura de 1,6 m. Como se ha mencionado antes, el diámetro del tanque será de 1,1 m. Con ello, el volumen del tanque sin contar la parte cónica se calcula de igual manera que en la **Ec. 1**, obteniendo un volumen de 1,52 m³.

Además, la parte cónica, puesta para facilitar la salida del líquido, añadirá una pequeña cantidad de volumen, que se calculará a partir del diámetro anterior y una altura máxima (h_{cono}) de 0,1 m. En la **Ec. 2** se puede ver el volumen añadido por la parte inferior:

$$V2 = \frac{1}{3} \times \pi \times \frac{\phi^2}{4} \times h_{cono} = \frac{1}{3} \times \pi \times \frac{1,1^2}{4} \times 0,1 = 0,032 \text{ m}^3 \text{ (Ec. 2)}$$

Por lo tanto, el volumen total del tanque será de 1,55 m³.

Bien es cierto que el cilindro ocupará parte de ese volumen del tanque, sin embargo, al tener poco espesor, ese volumen es irrisorio, tal y como se puede comprobar en la **Ec. 3**, por lo que no se tendrá en cuenta.

$$V = h \times \frac{\phi^2}{4} \times \pi = 2 \times \frac{(1-0,99)^2}{4} \times \pi = 0,157 \text{ dm}^3 \text{ (Ec. 3)}$$

En la **Tabla 4** se resumen las características del tanque:

Tabla 4. Medidas del tanque.

Parámetro	Medida
Altura cilindro	1,6 m
Altura cono	0,1 m
Diámetro	1,1 m
Espesor	10 mm
Volumen total	1,55 m ³

En el **Plano 3** se muestran las vistas que definen las características del tanque y en la **Figura 51** se muestra una vista de sección isométrica del mismo.

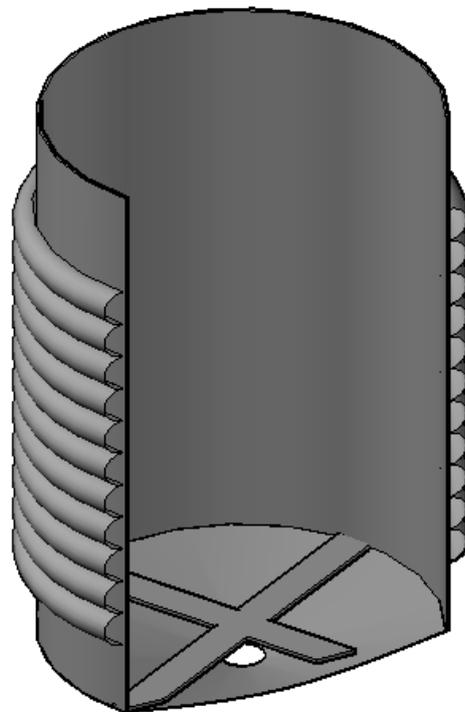


Figura 51. Vista de sección del tanque de mezclado.

Una vez establecido el diseño del tanque, es necesario evaluar las distintas condiciones de trabajo del tratamiento para adecuar el resto del proceso a ellas.

El sistema de agitación de los tanques se realizará mediante un agitador portátil, cuyas especificaciones se definen en el apartado **7.5. Diseño del sistema de agitación**.

7.3. Diseño del sistema de calefacción

Durante el proceso, existen dos momentos en los que se necesitará calentar un fluido. Uno de ellos se trata del baño caliente que se dará a los plásticos para facilitar la eliminación de restos de alcohol y su olor. Esto se realizará en el tanque, con el agua a una temperatura de aproximadamente 60°C. Éste agua será reutilizada del segundo caso, el circuito de calefacción del tanque, el cual se utilizará en caso de que las condiciones más favorables económicamente así lo requieran.

El sistema de calefacción consistirá en una camisa entorno al tanque, por la que circulará agua a 80°C para calentar el fluido del interior del tanque. Por esto, el agua de calefacción podrá reutilizarse en el baño final, ahorrando así agua y energía. El caudal de circulación por este sistema se ha establecido en 22 m³·h⁻¹ sin acogerse a ningún criterio en particular, más que la comprobación de caudales típicos en la industria. Para controlar la temperatura del fluido se utilizará un controlador que se encargará de abrir y cerrar el caudal de agua caliente.

Para calentar el agua se utilizará una caldera con un rendimiento del 90% y un potencia útil de 10000 kW. Para determinar estos valores se ha utilizado el catálogo de [Ygnis](#), en concreto, se ha elegido el modelo LRR: 10000 [30]. En la **Tabla 5** se recogen los parámetros más importantes del sistema de calefacción.

Tabla 5. Medidas del sistema de calefacción.

Parámetro	Medida
Rendimiento caldera	92%
Potencia útil caldera	10.000 kW
Caudal camisa calefactora	22 m ³ ·h ⁻¹
Temperatura fluido calefactor	80°C

7.4. Diseño del sistema de bombeo

Como se ha mencionado en el apartado anterior, el caudal del sistema de calefacción será de 22 m³·h⁻¹, por lo que se ha establecido éste como estándar para todo el proceso. El número de bombas necesarias para el funcionamiento completo será de siete: 2 para el sistema de calefacción, 1 para el bombeo de alcohol, 2 para el bombeo de agua, 1 para el bombeo del alcohol reutilizado y 1 para el bombeo de las aguas residuales.

Para el dimensionado de las bombas, se ha acudido al *Product Center* de la empresa Grundfos [31], en el que se pueden dimensionar bombas según los requerimientos. En los parámetros a introducir se ha establecido un caudal de 22 m³/h, una altura de 5 m y se ha buscado entre las bombas con aplicación industrial de máquina herramienta, especificando que pudiesen soportar temperaturas entre 0 y 80°C. El modelo seleccionado ha sido el *CR 20-1 A-A-A-V-HQQV*, cuyas especificaciones se detallan en la página de selección del producto [32]. La potencia consumida por las bombas en el punto de funcionamiento es de 0,979 kW. Para simplificar los cálculos, se establecerá un tiempo de funcionamiento igual para cada una de las condiciones de trabajo, cercano al tiempo más largo, que será el de bombeo del agua de calentamiento, para evitar subestimar los costes.

En la **Tabla 6** se recogen los datos más relevantes del sistema de bombeo:

Tabla 6. Medidas del sistema de bombeo.

Parámetro	Medida
Caudal de bombeo	22 m ³ ·h ⁻¹
Potencia consumida	0,979 kW
Nº de bombas	7

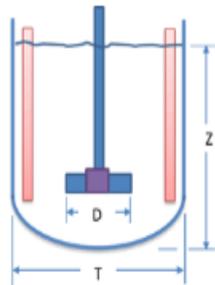
En lo referente al sistema de tuberías, se han medido los metros necesarios para cubrir la instalación a partir del **Plano 4**, de lo que se ha obtenido una necesidad de 44,75 m de tuberías. Para asegurar la correcta construcción de las canalizaciones, se ha supuesto un 10% más de longitud, resultando en 49,23 m. Las tuberías seleccionadas son de polipropileno, del catálogo de [EGBgroup](#). Dado que el caudal de la instalación es de 22 m³/h, se ha elegido un diámetro que permita tener una velocidad asequible (1,5 m/s), por lo que el modelo seleccionado es el PPR.TBFC90. Puesto que el modelo se adquiere del proveedor en packs de 4 m, se adquirirá un total de 52 m.

7.5. Diseño del sistema de agitación

Debido a que tanto si se trabaja con alcohol puro como con la mezcla más desfavorable (70%), las propiedades físicas que influyen en la agitación no varían significativamente, se pueden establecer unos estándares para todas las condiciones. Sin embargo, el tiempo de funcionamiento variará para cada una de ellas, tal y como se ha visto anteriormente. Para realizar el cálculo de la potencia requerida, se ha recurrido a CheCalc [28]. Con los parámetros indicados en la **Figura 52**, se obtiene una velocidad de agitación requerida de 267 rpm, y una potencia del motor 0,42 kW, suponiendo un rendimiento de éste de un 80%. El parámetro de “Scale of Agitation” corresponde a la naturaleza de la agitación, siendo la elegida, 4, un valor intermedio utilizado comúnmente en la industria química. Para obtener una guía con respecto a los precios para estas especificaciones, se ha buscado en distintos espacios de compra online, y se ha encontrado el modelo “3/4 HP Variable Speed Gear Drive Heavy Duty Clamp Mount”, el cual se puede encontrar en la página web de Mixer Direct [33], para utilizar como referencia. La

Tabla 7 recoge los parámetros más característicos del sistema de agitación.

Un factor importante del agitador es que tiene la necesidad de ser móvil, ya que debe agitar el contenido del cilindro interior, el cual necesita ser retirado y vuelto a colocar en repetidas ocasiones, por lo que es importante que el agitador se pueda adaptar a esta situación.



Batch Volume (v)

 m³

Agitator

 ▼

D/T Ratio

 ▼

Scale of Agitation

Fluid Properties

Density (ρ)

 Kg/m³

Viscosity (μ)

 cP

Figura 52. Parámetros para el cálculo de la agitación [28].

Tabla 7. Medidas del sistema de agitación.

Parámetro	Medida
Velocidad	267 rpm
Potencia motor	0,56 kW
Rendimiento motor	80%
Tipo de agitador	Hélice
Diámetro del agitador	0,3 m

7.6. Selección de las condiciones de operación en la instalación a partir del estudio económico de las mismas

A continuación, usando como base **los parámetros de la instalación diseñada**, se calculará el precio que cuesta tratar una tonelada de plástico para las diferentes condiciones de operación ensayadas.

De forma concreta, se tendrán en cuenta los tres factores que se han estudiado al determinar las **condiciones óptimas: tiempo de contacto, concentración y temperatura**. Se realizará el cálculo total en cada una de las condiciones establecidas en el apartado de resultados experimentales y se determinará la más eficiente. Para ello, los gastos correspondientes a los valores de tiempo y temperatura se compondrán de gastos energéticos para el calentamiento de las sustancias, la agitación de los tanques, etc.; mientras que los gastos en la concentración se corresponderán con los gastos en las dos sustancias a utilizar, agua de red y alcohol, en concreto a su obtención. Los cálculos no tendrán en cuenta el coste de instalación, montaje y mantenimiento, los cuales se detallan en el capítulo de presupuestos. Tampoco se incidirá en los costes de funcionamiento de la grúa, ya que debido a su corto tiempo de uso, éstos son despreciables y, además, comunes a todas las condiciones. En la **Tabla 8** se encuentran los valores de precios unitarios utilizados en los respectivos cálculos. Para establecer el precio por litro del alcohol se han visitado diversas webs de venta de productos químicos ([VWR](#), [Panreac](#), [Sigma Aldrich](#), [Fisher Scientific](#), etc.). Esto ha supuesto algunas dificultades, ya que en la mayoría de los sitios se requería consultar el precio con la empresa para obtenerlo o los volúmenes de compra eran muy pequeños y se encarecía mucho el precio. Finalmente se ha podido hacer una media entre las distintas fuentes y se ha fijado un precio de 2,71 euros·L⁻¹. Este precio difiere si se utiliza para evaluar el proceso industrial o para los ensayos de laboratorio, ya que las cantidades son muy distintas.

Tabla 8. Coste de los conceptos a estudiar.

Concepto	Precio
Agua de red	0,57 euros·m ³ [34]
Consumo eléctrico	0,11 euros·(kWh) ⁻¹ [35]
Éter metílico de dipropilenglicol	2,71 euros·L ⁻¹

Todos los cálculos realizados en este apartado siguen la misma estructura, por lo que se detallarán primero los de la condición óptima, la nº6, y después se completarán el resto de las condiciones con una estructura similar. Los tanques que se utilizarán contendrán 1 m³ de fluido, por lo que, siguiendo la relación mencionada anteriormente, en cada tratamiento se limpiarán 50 kg de plástico. Por lo tanto, al acabar los cálculos se multiplicarán por 20 para obtener el precio por tonelada.

Condiciones nº6

El caso que se va a ejemplificar es el número 6 de la **Tabla 2**, en el que se lleva una mezcla de alcohol y agua al 70% hasta 60°C y se mantiene en agitación durante 20 minutos. Tras esto, y como factor común a todas las condiciones, se situará el plástico bajo una ducha de agua a temperatura ambiente, y posteriormente, se someterá a un baño de agua caliente.

Antes de comenzar los cálculos, se va a realizar un resumen de las propiedades de ambos fluidos, agilizando así la información y teniendo un punto de referencia. Dichas propiedades se refieren a la sustancia a 20°C a no ser que se indique lo contrario. En la **Tabla 9** se encuentran los datos correspondientes a los parámetros característicos del agua y en la **Tabla 10** los del alcohol.

Tabla 9. Propiedades del agua.

Propiedad	Valor
Densidad	997 kg·m ⁻³
Conductividad térmica (80°C)	667 W·m ⁻¹ ·°C ⁻¹ [36]
Viscosidad	1 cp
Calor específico	4,187 J·g ⁻¹ ·°C ⁻¹

Tabla 10. Propiedades del éter metílico de dipropilenglicol [37].

Propiedad	Valor
Densidad	953 kg·m ⁻³
Conductividad térmica	0,11 W·m ⁻¹ ·°C ⁻¹
Viscosidad	4,3 cp
Calor específico	2 J·g ⁻¹ ·°C ⁻¹

Calentamiento del alcohol

Para este tratamiento, es necesario llevar la mezcla hasta los 60°C. Para ello, ya que la recomendación es almacenar en alcohol a temperaturas relativamente bajas, se supondrá una temperatura inicial (T₁) de éste de 5°C. Por otra parte, el agua de red se supone a una temperatura de 18°C (T₂). Por lo tanto, se determinará la temperatura inicial de la mezcla utilizando la **Ec. 4**, siendo la masa de alcohol (m₁) y la masa de agua (m₂). El calentamiento se realizará mediante el sistema de calefacción de un tanque con camisa, cuyo fluido calentador será el agua. El calentamiento del alcohol se vigilará mediante un controlador, el cual controlará el caudal del sistema de calefacción en función de las necesidades. Aun así, los cálculos se realizarán suponiendo que el caudal está al máximo en todo momento.

$$T_{mezcla} = \frac{m_1 \times T_1 + m_2 \times T_2}{m_1 + m_2} = \frac{667,1 \text{ kg} \times 5^\circ\text{C} + 300 \text{ kg} \times 18^\circ\text{C}}{967,1 \text{ kg}} = 9,03^\circ\text{C} \text{ (Ec. 4)}$$

La fórmula que se ha utilizado para calcular el coste energético para calentar las sustancias es la **Ec. 5**:

$$\text{Energía (kWh} \cdot \text{m}^{-3}) = \text{calor específico (kWh} \cdot \text{L}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}) \times 1000 (\text{L} \cdot \text{m}^{-3}) \times \Delta T (^\circ\text{C}) \text{ (Ec. 5)}$$

El calor específico del agua es de 0,00116 kWh·L⁻¹·°C⁻¹ [38] y el del éter metílico de dipropilenglicol es de 0,00053 kWh L⁻¹·°C⁻¹ [37]. Sin embargo, en estas condiciones las sustancias no se encuentran puras, por lo que es necesario calcular el calor específico de la mezcla. Para obtenerlo se utiliza la **Ec. 6**, sustituyendo los calores específicos (C_p) tal y como se muestra en la **Ec. 7**.

$$C_{pmezcla} (\text{kWh} \cdot \text{L}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}) = \frac{m_1}{m_{mezcla}} \times C_{p1} + \frac{m_2}{m_{mezcla}} \times C_{p2} \text{ (Ec. 6)}$$

$$\begin{aligned} C_{pmezcla} &= \frac{0,7 \text{ m}^3 \times 953 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}}{0,7 \text{ m}^3 \times 953 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} + 300 \text{ kg}} \times C_{p1} + \frac{300 \text{ kg}}{0,7 \text{ m}^3 \times 953 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} + 300 \text{ kg}} \times C_{p2} \\ &= \frac{667,1 \text{ kg}}{967,1 \text{ kg}} \times 0,00053 \text{ kWh} \cdot \text{L}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1} + \frac{300 \text{ kg}}{967,1 \text{ kg}} \times 0,00116 \text{ kWh} \cdot \text{L}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1} \\ &= 0,000725 \text{ kWh} \cdot \text{L}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1} \text{ (Ec. 7)} \end{aligned}$$

Tal y como se ha determinado en el apartado anterior, el volumen que se utilizará será de 1 m³, por lo que para calentarlo será necesario aportar un Q = 36,95 kWh, o lo que es lo mismo, Q = 1,33·E⁺⁰⁸ J. Para aportar esta energía, se utilizará una camisa calefactora que envolverá al tanque. Con los parámetros que aparecen en las **Figuras 50 y 51**, se obtiene el valor de la constante de transferencia de calor, U = 993,02 W·m⁻²·°C⁻¹. Para obtener estos parámetros, ha sido necesario recalcular tanto la conductividad térmica (k), la viscosidad (μ) y la densidad (ρ), utilizando la **Ec. 8, 9 y 10**, respectivamente. Utilizando la **Ec. 11** para obtener el **tiempo de calentamiento del alcohol**, se puede obtener el tiempo de calentamiento, por lo que es necesario cambiar las unidades de la transferencia de calor a U = 993,02 J·s⁻¹·m⁻²·°C⁻¹, añadiendo así el tiempo como incógnita.

$$\mu = \frac{667,1 \text{ kg} \times 4,3 \text{ cp} + 300 \text{ kg} \times 1 \text{ cp}}{967,1 \text{ kg}} = 3,27 \text{ cp (Ec. 8)}$$

$$k = \frac{667,1 \text{ kg} \times 0,11 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1} + 300 \text{ kg} \times 667 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1}}{967,1 \text{ kg}} = 206,98 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1} \text{ (Ec. 9)}$$

$$\rho = \frac{967,1 \text{ kg}}{1 \text{ m}^3} = 967,1 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \text{ (Ec. 10)}$$

$$Q = A \times U \times \Delta T \times t \text{ (Ec. 11)}$$

Figura 53. Datos del tanque para el cálculo del coeficiente de transferencia de calor [28].

Siendo Q = 1,33·E⁺⁰⁸ J, A el área interior del tanque, en contacto con el alcohol cuyo valor es de 4,97 m², U el coeficiente de transferencia mencionado con anterioridad, ΔT la diferencia de temperaturas entre el agua caliente y el alcohol y t el tiempo. Para poder reutilizar el agua de calentamiento en el baño posterior, se calentará hasta una temperatura de 80°C. La temperatura de la mezcla será una media entre la mínima (9,03) y la máxima a alcanzar (60). Una vez sustituidos todos los términos, se obtiene un valor para el tiempo de calentamiento del alcohol de t = 9,87 min.

Select	Annular, Spiral Baffling
Width Annular space (w)	50 mm
Spiral Baffle Pitch (p)	150 mm
Flowrate (Q)	22 m ³ /h
Fouling Factor (f _f)	0.00018 m ² ·°K/W
Properties	
Density (ρ)	993 Kg/m ³
Viscosity (μ)	1 cP
Specific Heat (c _p)	4.187 KJ/Kg·°K
Conductivity (k)	667 W/m·°K
Viscosity @ Wall (μ _w)	1 cP

Select Agitator	Propellor
Agitator Diameter	267 mm
Agitator Speed	50.0 rpm
Fouling Factor (f _f)	0.00018 m ² ·°K/W
Properties	
Density (ρ)	967.1 Kg/m ³
Viscosity (μ)	3.27 cP
Specific Heat (c _w)	2.74 KJ/Kg·°K
Conductivity (k)	207 W/m·°K
Viscosity @ Wall (μ _w)	3.27 cP
Vessel Side Calculation	

Figura 54. Datos de la camisa y el interior del tanque para el cálculo del coeficiente de transferencia de calor [28].

Calentamiento del agua de calefacción

Tal y como se describe en la **Ec. 5**, la energía necesaria para calentar 1 m³ de agua depende de las temperaturas iniciales y finales de ésta. Se tomará como valor de temperatura inicial 18°C, y se pretende subir la temperatura hasta 80°C, para mantener la mezcla a la temperatura deseada durante el tratamiento.

Una vez establecido el intervalo de temperaturas, se hace necesario calcular el volumen de agua total a calentar para el tratamiento. A continuación, durante el baño con alcohol se bombeará agua por el sistema de calefacción a un caudal (Q) de 22 m³·h⁻¹, lo que, con un tiempo de agitación (t) de 20 minutos, más 9,87 min de calentamiento, se ha de bombear el agua durante unos 30 minutos. Con ello, se obtiene el volumen de agua necesario a calentar para llevar el alcohol hasta los 60°C, tal y como muestra la **Ec. 12**:

$$V = Q \times t = 0,367 \frac{m^3}{min} \times 29,87 min = 10,96 m^3 \text{ (Ec. 12)}$$

Para trabajar con valores más exactos se redondeará el volumen hasta 11 m³. Para calcular el coste de calentamiento de este volumen de agua, se acudirá de nuevo a la **Ec. 5**, en la que, sustituyendo los términos conocidos, se obtienen los resultados reflejados en la **Ec. 13**:

$$Q = 0,00116 kWh \cdot L^{-1} \cdot ^\circ C^{-1} \times 1000 L \cdot m^{-3} \times (80 - 18)^\circ C \times 11 m^3 = 791,12 kWh \text{ (Ec. 13)}$$

Aplicando el rendimiento del 92% que se ha establecido para la caldera, la energía total consumida es de 859,91 kWh, lo que, para una potencia de caldera de 10.000 kW, supone un tiempo de calentamiento para el agua de 5,16 minutos.

Parte de esta agua se reutilizará en el baño final que se realiza para eliminar los restos de alcohol, aprovechando así que su temperatura se ha aumentado y no necesitando consumir más. Así mismo, en un estudio más detallado de la instalación se podría plantear la posibilidad de reutilizar prácticamente toda el agua en los procesos siguientes, lo que ahorraría costes tanto en consumo de agua como eléctrico, sin embargo, complicaría los cálculos, por lo que se va a establecer el mismo consumo para cada proceso.

Agua de limpieza

En la primera parte se realiza una ducha previa (Etapa 2: lavado 1 con agua) para eliminar las posibles impurezas que el agua pueda eliminar con facilidad, como polvo u otro tipo de suciedad contenido en los residuos plásticos. Ésta durará 5 minutos, con un caudal de 0.367 m³/min, por lo que en total gastará 1.835 m³, lo que se redondeará a 2 m³ para evitar problemas por posibles pérdidas. Teniendo en cuenta que la misma etapa se realizará tras el baño de alcohol (Etapa 5: lavado 2) con agua, la cantidad de agua asciende a 4 m³.

Tras los tratamientos, es necesario limpiar los restos que hayan podido quedar en los tanques de alcohol y agua contaminados, por lo que se realizará un baño de agua con agitación durante 5 minutos tras cada uso. Tras el llenado de éstos con el agua comenzará la agitación y se abrirá la válvula inferior, que retirará agua con un caudal igual al de entrada, manteniendo así el volumen del tanque constante. Por lo tanto, el volumen de agua utilizada por cada tanque será de 1 m³ para el llenado inicial más 1,835 m³ que entrarán durante los cinco minutos. El volumen de agua de limpieza utilizado será de 2,835 m³, que se redondeará a 3 m³.

Consumo energético de agitación

Con la potencia del motor mencionada anteriormente y un tiempo de agitación de 50 minutos (9,87 durante el calentamiento, 20 de tratamiento con alcohol, 10 de baño en agua caliente y 10 durante la limpieza), se calculan los kWh consumidos por el agitador, tal y como se observa en la **Ec. 14**:

$$E_{consumida} = 0,56 \text{ kW} \times \frac{50}{60} \text{ h} = 0.467 \text{ kWh (Ec. 14)}$$

Consumo energético de bombeo

La potencia consumida por las bombas en el punto de funcionamiento es de 0,979 kW, y se van a instalar 7 bombas para completar el recorrido de toda la instalación. El tiempo de funcionamiento de cada bomba será distinto, pero se ha elegido un valor aproximado de 20 minutos para simplificar los cálculos. Haciendo uso de la **Ec. 14**, se obtiene un consumo energético total de todas las bombas de $E = 2,28 \text{ kWh}$.

Precios finales

A continuación, se muestra la **Tabla 11**, en la cual se resumen las cantidades finales que se utilizan en un proceso y los precios que se obtienen de estos, obteniendo un precio total para las condiciones de trabajo de 60°C, 20 minutos y 70% de concentración es de 40.080,6 euros por tonelada.

Tabla 11. Precios para tratar 50 kg de plástico en las condiciones número 6.

Concepto	Cantidad	Precio (euros)
Agua de calentamiento	11 m ³	6,27
Agua de limpieza	6 m ³	3,42
Agua de ducha	4 m ³	2,28
Agua de mezcla	0,3 m ³	0,171
Agua consumida total	21,3 m³	12,14
Energía de calentamiento	859,91 kWh	94,59
Energía de bombeo	2,28 kWh	0,25
Energía de agitación	0,467 kWh	0,05
Energía consumida total	862,657 kWh	94,89
Éter metílico de propilenglicol	0,7 m³	1.897
Precio final por cada 50 kg		2.004,03

Cabe destacar que el precio del alcohol está promediado entre los precios de distintos distribuidores, por lo que se podría obtener un mejor precio dependiendo del distribuidor y la cantidad del pedido.

Condiciones nº 1

La primera de las condiciones con las que se va a trabajar requiere una temperatura de 20°C para una mezcla del 80% en alcohol y agua que agite durante 30 minutos. Las ventajas de este tratamiento residen en el trabajo a temperaturas ambiente, lo que elimina la necesidad de circuitos de calefacción en el diseño. La única implicación que tendrá esto sobre el proceso será la necesidad de dejar atemperar el alcohol a temperatura ambiente, que tan solo supondrá un tiempo de espera de entre 15 y 20 minutos, el cual no repercutirá en los parámetros de cálculo. Teniendo todo esto en cuenta, tan sólo es necesario el cálculo de la energía consumida por la agitación y el bombeo antes de calcular el precio final, además del calentamiento del agua para el baño final.

El agua del baño se introducirá a 80°C con la intención de que se mantenga por encima de 60°C durante los 10 minutos. Con esto, se puede utilizar los cálculos ya realizados en el caso anterior, donde se obtenía la potencia necesaria para calentar 11 m³ era de 791,12 kWh, por lo que, para calentar 1 m³, serán necesarios 79,92 kWh, que, aplicando el rendimiento de la caldera, queda en 86,87 kWh.

Haciendo uso de la **Ec. 14**, para un tiempo de agitación de 30 minutos durante el baño en alcohol y 10 durante el baño de agua, más los 10 minutos utilizados para la limpieza de los tanques, se obtiene un tiempo total de 50 minutos, con un consumo de 0,467 kWh. Mientras que para las bombas, se estima un tiempo de trabajo de 10 minutos por bomba. Esto resulta en un consumo de 1,14 kWh.

La **Tabla 12** muestra un resumen de las cantidades a utilizar durante el proceso y los precios correspondientes a cada una de éstas, así como el precio final para un proceso en el que se traten 50 kg. Una vez establecido este coste, es fácil obtener que el precio por tratar una tonelada es de 43.682,33 euros·tn⁻¹.

Tabla 12. Precios para tratar 50 kg de plástico en las condiciones número 1.

Concepto	Cantidad	Precio (euros)
Agua de calentamiento	1 m ³	0,570
Agua de limpieza	6 m ³	3,420
Agua de ducha	4 m ³	2,280
Agua de mezcla	0,2 m ³	0,114
Agua consumida total	11,2 m³	6,384
Energía de calentamiento	86,87 kWh	9,550
Energía de bombeo	1,14 kWh	0,125
Energía de agitación	0,467 kWh	0,051
Energía consumida total	88,477 kWh	9,732
Éter metílico de propilenglicol	0,8 m³	2.168
Precio final por cada 50 kg		2.184,116

Condiciones nº 2

Los parámetros de funcionamiento de este tratamiento son: alcohol puro a una temperatura de 20°C agitando durante 22 minutos. Por lo tanto, las condiciones son muy similares al apartado anterior, ya que no requiere más calefacción que la necesaria para calentar el agua del baño. Haciendo uso de las mismas ecuaciones, se obtiene un gasto energético de 0,392 kWh para 42 minutos de agitación y de 1,14 kWh para el bombeo, ya que se mantiene la misma operatoria que en el apartado anterior. Además, la energía de calentamiento será la misma que la anterior, 86,87 kWh.

Con estos valores se obtienen los precios listados en la **Tabla 13**, de donde se puede extraer que el precio por tonelada para un tratamiento con estas condiciones es de 54.519,88 euros·tn⁻¹.

Tabla 13. Precios para tratar 50 kg de plástico en las condiciones número 2.

Concepto	Cantidad	Precio (euros)
Agua de calentamiento	1 m ³	0,57
Agua de limpieza	6 m ³	3,42
Agua de ducha	4 m ³	5,70
Agua consumida total	11 m³	6,27
Energía de calentamiento	86,87 kWh	9,56
Energía de bombeo	1,14 kWh	0,13
Energía de agitación	0,392 kWh	0,04
Energía consumida total	88,402 kWh	9,72
Éter metílico de propilenglicol	1 m³	2.710
Precio final por cada 50 kg		2.726

Condiciones nº 3

Para las terceras condiciones determinadas se utilizará una disolución pura de alcohol que se llevará hasta 40°C, y se mantendrá en agitación durante 16 minutos. Para ello es necesario calcular la energía necesaria tanto para el calentamiento del agua como el del alcohol de la misma manera que se realizó para las condiciones 6.

El calor necesario para calentar el alcohol se calcula mediante la **Ec. 5** con la que se obtiene $Q = 18,55 \text{ kWh} = 6,678 \cdot 10^7 \text{ J}$. Para aprovechar los cálculos ya realizados, el agua se calentará hasta 80°C para realizar el calentamiento del alcohol, por lo que, sustituyendo la **Ec. 11** tal y como aparece en la **Ec. 15**, se despeja el tiempo necesario para calentar el alcohol, el cual es de 6,38 minutos.

$$Q = 4,97 \text{ m}^2 \times 610,691 \text{ J} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{°C}^{-1} \times \left(80 - \frac{40+5}{2}\right) \times t = 66780000 \text{ J} \text{ (Ec. 15)}$$

Una vez obtenido el tiempo necesario para calentar, sumado al tiempo de agitación (22,38 min), se calcula la cantidad de agua a calentar de la misma forma que en la **Ec. 12**, lo que da un resultado de 8,21 m³ de agua, que se redondeará a 9 m³. Al ser mayor de 1 m³, ésta se podrá reutilizar para el baño posterior, por lo que no es necesario calentar más agua.

Como ya se ha calculado anteriormente la energía necesaria para calentar 1 m³ (86,87 kWh), tan sólo es necesario adaptarla a los 9 m³ actuales, resultando en una energía de 781,83 kWh.

Para calcular la energía consumida en el bombeo, se han estimado 15 minutos de trabajo medio para cada una de las siete bombas, lo que resulta en una energía de 1,71 kWh.

Por último, la agitación se realizará durante los 16 minutos de tratamiento, más 7 de llenado para la homogeneización de la temperatura y 10 para la limpieza de los tanques, lo que hace un total de 33 minutos, consumiendo una energía de 0,308 kWh.

Con estos parámetros se obtienen los costes reflejados en la **Tabla 14**, siendo el valor final de 56.141,06 euros/tonelada.

Tabla 14. Precios para tratar 50 kg de plástico en las condiciones número 3.

Concepto	Cantidad	Precio (euros)
Agua de calentamiento	9 m ³	5,13
Agua de limpieza	6 m ³	3,42
Agua de ducha	4 m ³	2,28
Agua consumida total	19 m³	10,83
Energía de calentamiento	781,83 kWh	86
Energía de bombeo	1,71 kWh	0,19
Energía de agitación	0,308 kWh	0,03
Energía consumida total	783,848 kWh	86,22
Éter metílico de propilenglicol	1 m³	2.710
Precio final por cada 50 kg		2.807,05

Condiciones nº 4

Para estas condiciones de trabajo se tiene una mezcla del 80% alcohol-agua, a una temperatura de 40°C, agitando durante 27 minutos. Antes de repetir los pasos que se han realizado para el resto de las condiciones, es necesario calcular el calor específico de la mezcla, tal y como se ha realizado en el cálculo de las condiciones nº6. Para ello se sustituirán los términos en la **Ec. 6**, obteniendo las masas como el volumen por la densidad y utilizando los calores específicos de las sustancias que se han mencionado en apartados anteriores, obteniendo un calor específico de 0,000661 kWh·L⁻¹·°C⁻¹.

Una vez determinado se procede a repetir los cálculos anteriormente realizados, comenzando por el calor necesario para llevar la mezcla hasta los 40°C. Primero, se debe determinar la temperatura

inicial de la mezcla, siendo la del agua 18°C y la del alcohol 5°C. Para realizar este cálculo se utiliza la **Ec. 4**. Cuando se ha determinado la temperatura inicial de la mezcla, 7,7°C, se acude nuevamente a la **Ec. 5**, de donde se obtiene un calor necesario de 21,35 kWh, que equivalen a $7,68 \cdot 10^7$ J.

A continuación hay que aplicar la **Ec. 11**, por lo que es necesario recalcular el coeficiente de transferencia de calor (U), ya que las propiedades del fluido a calentar han cambiado. Para ello se hace uso de CheCalc y se introducen las nuevas propiedades (**Figura 55**), manteniendo las anteriores para el tanque y el fluido caliente. Para determinar propiedades como la viscosidad y la conductividad térmica, se ha acudido a estimaciones siguiendo una ecuación equivalente a la utilizada para el calor específico y la temperatura de mezcla, tal y como se puede ver en las **Ecs. 8 y 9**. Esta aproximación es una simplificación, debido a que la complejidad del cálculo no está justificada por el efecto del parámetro en el resultado final, siendo el método más sencillo de obtención de estos datos las pruebas experimentales. Mientras, la densidad se ha hallado como se muestra en la **Ec. 10**.

Con estos parámetros se obtiene un coeficiente de transferencia de calor igual a $989,32 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{°C}^{-1}$, el cual se puede sustituir en la **Ec. 11** para obtener así el tiempo necesario de calentamiento, resultando este en 4,64 minutos.

A partir de este tiempo se calcula el volumen de agua necesario para el calentamiento, sumando el tiempo de calentamiento al de agitación (31,64 min), lo que mediante una operatoria equivalente a la realizada en la **Ec. 12** se obtiene un volumen de agua de $11,61 \text{ m}^3$, el cual se redondeará a 12 m^3 , la cual consumirá 1042,44 kWh para calentarse.

Una vez terminados estos cálculos, solo resta determinar el consumo de bombeo y agitación. Para el primero se considerará un tiempo medio de bombeo de 20 minutos, lo que resulta en un consumo de 2,28 kWh. La agitación se produce durante 51,64 minutos (31,64 de calentamiento y tratamiento, 10 de baño caliente y 10 de limpieza), lo que produce un gasto de energía de 0,482 kWh.

Con todos los datos obtenidos, se calculan los precios correspondientes a las condiciones de trabajo actuales, reflejados en la **Tabla 15**, con los que se obtiene un precio final de 45.912,4 euros·tn⁻¹.

Vessel ^

Select Agitator
Propellor ▼

Agitator Diameter
279 mm

Agitator Speed
290 rpm

Fouling Factor (f_w)
0.00018 $m^2 \cdot ^\circ K/W$

Properties

Density (ρ)
962.4 Kg/m^3

Viscosity (μ)
3.61 cP

Specific Heat (C_w)
2.5 $KJ/Kg \cdot ^\circ K$

Conductivity (k)
138.7 $W/m \cdot ^\circ K$

Viscosity @ Wall (μ_w)
3.61 cP

Figura 55. Propiedades de la mezcla en las condiciones nº 4.

Tabla 15. Precios para tratar 50 kg de plástico en las condiciones número 4.

Concepto	Cantidad	Precio (euros)
Agua de calentamiento	12 m ³	6,84
Agua de limpieza	6 m ³	3,42
Agua de ducha	4 m ³	2,28
Agua de mezcla	0,2 m ³	0,11
Agua consumida total	22,2 m³	12,65
Energía de calentamiento	1042,44 kWh	114,67
Energía de bombeo	2,28 kWh	0,25
Energía de agitación	0,48 kWh	0,05
Energía consumida total	1045,20 kWh	114,97
Éter metílico de propilenglicol	0,8 m³	2.168
Precio final por cada 50 kg		2.295,62

Condiciones nº 5

Para la situación 5 se va a utilizar una mezcla al 100% de alcohol, que se llevará a una temperatura de 60°C y se mantendrá en agitación durante 11 minutos.

Con estos datos, se acude a CheCalc para la obtención del coeficiente de transferencia térmica, el cual adquiere un valor de $610,691 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{°C}^{-1}$. Usando la **Ec. 5**, se determina la cantidad de calor necesaria para calentar el alcohol hasta los 60°C, con lo que se obtiene $Q = 29,15 \text{ kWh} = 1,045 \text{ E}^{+08} \text{ J}$.

Usando la **Ec. 11**, se obtiene un tiempo de calentamiento del alcohol de 12,08 minutos. Con este resultado de tiempo, más los 20 minutos necesarios de agitación, se calcula el caudal máximo de agua que se necesitaría para mantener la temperatura en 60°C usando la **Ec. 12**. Este caudal es de 8,441 m³, que se redondeará a 9 m³. Para calentar este volumen de agua será necesario emplear 781,74 kWh de energía, lo que corresponde a 4,69 minutos de calentamiento.

Por último, el consumo de energía por agitación se producirá durante los 30 minutos de calentamiento y tratamiento, más los habituales 10 minutos de baño y 10 de limpieza, haciendo un total de 50 minutos, suponiendo así un coste de energía de 0,467 kWh. Por otra parte, el tiempo de bombeo se estima en 20 minutos por bomba, lo cual resulta en un consumo de 2,28 kWh.

La **Tabla 16** recoge los valores obtenidos, así como el precio final de 56.142,47 euros·tn⁻¹.

Tabla 16. Precios para tratar 50 kg de plástico en las condiciones número 5.

Concepto	Cantidad	Precio (euros)
Agua de calentamiento	9 m ³	5,13
Agua de limpieza	6 m ³	3,42
Agua de ducha	4 m ³	2,28
Agua consumida total	19 m³	10,83
Energía de calentamiento	781,74 kWh	85,99
Energía de bombeo	2,28 kWh	0,25
Energía de agitación	0,467 kWh	0,05
Energía consumida total	784,49 kWh	86,29
Éter metílico de propilenglicol	1 m³	2.710
Precio final por cada 50 kg		2.807,12

En la **Tabla 17** se resumen las condiciones de trabajo y el precio final de cada una.

Tabla 17. Coste por tonelada en cada una de las condiciones de estudio.

	Temperatura (°C)	Concentración (%)	Tiempo (min)	Precio (euros·tn ⁻¹)
1	20	80	30	43.682
2	20	100	22	54.520
3	40	100	16	56.141
4	40	80	27	45.912
5	60	100	11	56.142
6	60	70	20	40.080,6

Tal y como se muestra, **las condiciones de trabajo más favorables se encuentran a 60°C y un 70% de alcohol en la mezcla, con una agitación de 20 minutos**. Esto es debido a que el factor que más encarece el precio es el alcohol, y esta opción es la que menos consume, gracias a las altas

temperaturas y un tiempo de agitación mayor. Aun así, este precio es demasiado alto para ser competitivo, por lo que es necesario disminuir la cantidad de alcohol a comprar.

Para solucionar este problema, se reutilizará un 90% del alcohol gastado mediante un tratamiento de aguas residuales paralelo al proceso diseñado, consistente en filtración con carbón activo. La mezcla contaminada pasará por un filtro de carbón activo, para retener los contaminantes que hayan absorbido del plástico, y se almacenarán en un depósito para su reutilización. Se establece que este proceso de reutilización se podrá realizar durante 20 días, o lo que es lo mismo, cada tonelada de plástico tratado, tras lo cual será necesario realizar el próximo tratamiento con alcohol sin reutilizar. Para ello se añade una conducción extra en el tanque de mezcla del tratamiento por donde entrará el alcohol reutilizado.

Con estos porcentajes, se recupera un 90% del alcohol utilizado en cada tratamiento, por lo que solo es necesario abastecerse de una décima parte en cada tratamiento a partir del primero. Esto cambia el volumen a comprar por tonelada, siendo este de 0,7 m³ para el primer tratamiento, pero de 0,07 m³ en los sucesivos. De igual manera sucederá con el agua, aunque ésta será menos notoria por ser ostensiblemente más barata. Por lo tanto, el precio final es el que se refleja en la **Tabla 18**, siendo éste de 7.639 euros por cada tonelada de plástico a tratar.

Tabla 18. Coste del tratamiento en las condiciones nº6 tras la reutilización.

Concepto	Cantidad por tonelada	Precio (euros)
Éter metílico de dipropilenglicol	2,03 m ³	5.501,3
Agua de mezcla	0,87 m ³	0,5
Precio final por tonelada		7.639

Medidas de seguridad

Para asegurar el correcto funcionamiento del proceso y la salud del operario, es necesario implementar ciertas medidas de seguridad básicas:

- **Guantes térmicos:** dado que el trabajo se realiza a temperaturas lo suficientemente altas como para producir daños, es necesario el uso de guantes térmicos para complementar el aislamiento de la camisa calefactora.
- **Ventilación por extracción localizada:** a pesar de que en pequeñas cantidades no genera peligros, un volumen tan grande de alcohol, a las temperaturas señaladas, provocará la evaporación de parte de éste, el cual en grandes cantidades puede generar somnolencia y mareos, haciendo necesaria una buena ventilación que elimine los restos de alcohol en el aire.
- **Gafas de protección:** al ser un proceso de agitación en el que además se encuentran sólidos, existe la posibilidad de que haya salpicaduras, y dado que es necesario que el operario interactúe con el tanque, la colocación de paneles de protección se dificulta, por lo que el uso de gafas de protección se hace más que recomendable.

8. DESCRIPCIÓN DE LA INSTALACIÓN

Una vez finalizado todo el diseño de la instalación, surge la necesidad de realizar un pequeño resumen de su funcionamiento y sus parámetros. Para ayudar a una mejor comprensión, se hará uso de la **Figura 56**, en la que se representa la distribución en planta elegida, extraída del **Plano 4**.

En primer lugar, se colocará manualmente el filtro de celulosa en el fondo del cilindro, cuyos diámetros tienen valores de 1 m. Una vez colocado se realiza la carga de los 50 kg de residuo plástico (1) y se engancha el cilindro a la grúa. El operario accionará la grúa, la cual desplazará el cilindro hasta la zona de ducha (2), donde se bombea agua a 22 m³/h durante 5 minutos para realizar una limpieza superficial del plástico, la cual caerá al depósito abierto situado debajo. Tras el tiempo de ducha, el cilindro seguirá suspendido sobre el depósito (3), goteando el agua sobrante de la limpieza, durante 5 minutos.

A continuación, el operario volverá a accionar la grúa, desplazando el cilindro hasta el tanque de mezcla de $V = 1,5 \text{ m}^3$ (4), donde facilitará su acople, el cual es posible dado que el diámetro del tanque es ligeramente superior (1,1 m) al del cilindro. La diferencia de altura del cilindro (2 m) con respecto a la del tanque (1,6 m) consigue que el volumen de ambos equipos sea muy similar, evitando así desbordamientos. Una vez situado el tanque, se procede a su llenado para el tratamiento con alcohol. Con un caudal de 22 m³/h se verterá 1 m³ de líquido en el tanque, siendo un 70% alcohol y el resto agua. Una vez completo el llenado, se acopla el sistema de agitación portátil y se acciona a una velocidad de 270 rpm para homogeneizar la mezcla. Paralelamente, comenzará el circuito del agua de calefacción, previamente calentada en una caldera industrial de 10.000 kW, la cual circulará a través del encamisado del tanque a un caudal de 22 m³/h y una temperatura de 80°C, con el objetivo de llevar la mezcla hasta una temperatura de 60°C. Una vez alcanzada la temperatura, la agitación continuará durante 20 minutos más a la misma velocidad, para mejorar las condiciones hidrodinámicas y de contacto entre el plástico y el alcohol. Durante este tiempo un controlador se encargará de regular el caudal de agua de calefacción para mantener la temperatura en 60°C. Al finalizar el tiempo de agitación, se retirará el agitador y se abrirá la válvula inferior del tanque, la cual permitirá la evacuación de las aguas residuales. Éstas se someterán a un proceso de limpieza en el que circularán a través de un lecho de carbón activo y se almacenarán en un depósito ($V = 1,5 \text{ m}^3$), para la reutilización de la mezcla en los siguientes procesos. Se ha estimado unas pérdidas del 10% de la mezcla contabilizando los restos que puedan quedar en el tanque y los plásticos.

El siguiente paso es idéntico al 2, el operario acoplará el cilindro a la grúa y lo desplazará hasta la zona de ducha, donde se bombeará agua durante 5 minutos para eliminar el alcohol residual que pueda haber quedado en los residuos plásticos (5), siendo las aguas residuales recogidas de nuevo en el depósito abierto, así como el goteo durante el escurrido de 5 minutos posterior a la ducha (6). Paralelamente a estos dos pasos, se realizará un lavado del tanque para eliminar los posibles restos de alcohol. Para ello circulará agua a temperatura ambiente durante 5 minutos, con un caudal de 22 m³/h, en los que la agitación estará activa a 270 rpm.

El último paso consiste en un lavado con agua caliente en el tanque de mezcla, hasta donde se volverá a transportar el cilindro tras el escurrido. Tras el acople del cilindro, se llenará el tanque con 1 m³ del agua caliente utilizada en la calefacción del tratamiento con alcohol y se activará la agitación durante 10 minutos a 270 rpm (7). Con esto se realizará un baño con la intención de eliminar la mayor

cantidad de olor de alcohol posible, tras lo cual se abrirá la válvula del tanque para retirar el agua residual y se retirarán los plásticos para su secado, el cual no necesita supervisión y se producirá en un lugar seco durante dos días. Una vez retirado el plástico se procederá a una nueva limpieza del tanque, de nuevo durante 5 minutos, para eliminar todos los restos que puedan quedar.

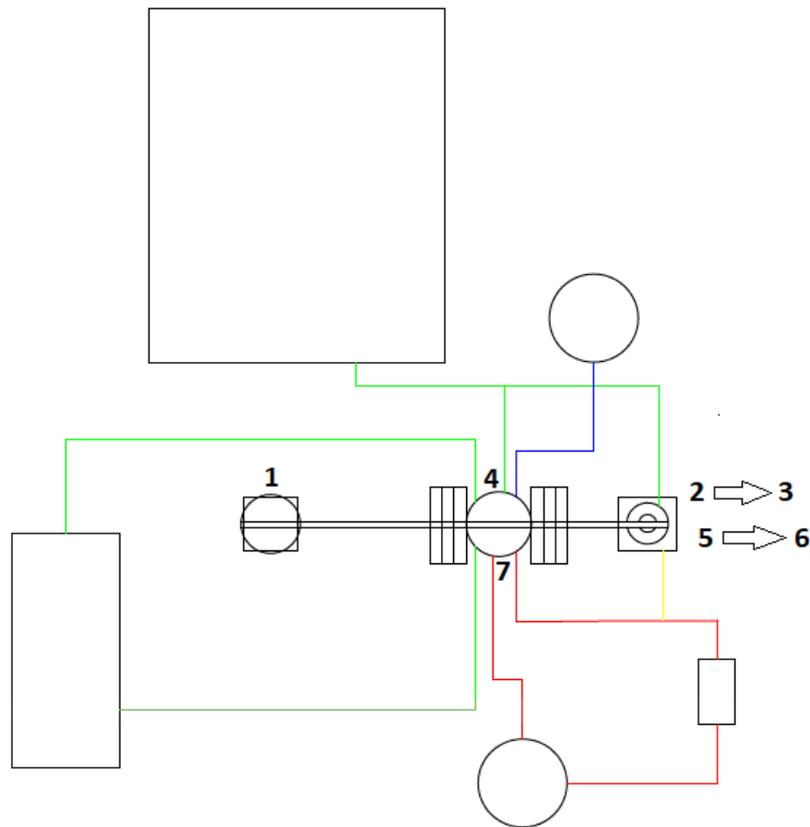


Figura 56. Distribución en planta con la numeración de los pasos

9. ESTUDIO ECONÓMICO

En este apartado se realizará un estudio completo de los costes asociados en el tratamiento de una tonelada de plástico. Para ello, se divide lo ya calculado en categorías mejor espaciadas y añadiendo el personal de trabajo y los costes dispuestos para imprevistos.

Los costes de operación del proceso completo incluyen:

- Energía
- Personal
- Reactivos
- Varios

Algunos de estos costes ya han sido detallados durante la valoración económica de las condiciones, por lo que los siguientes apartados actuarán como resumen de esos cálculos ya realizados.

9.1. Energía

En la **Tabla 19** se resumen los costes en concepto de energía por tonelada de plástico a tratar mediante el proceso detallado.

Tabla 19. Costes energéticos del proceso.

Concepto	Unidades	Potencia necesaria (kW)	Tiempo funcionamiento (h·tn ⁻¹)	Consumo (kWh·tn ⁻¹)	Coste total (€·tn ⁻¹)
Caldera	1	10.000	1,72	17.200	1892
Bomba	7	0,979	6,67	6,53	0,72
Agitador	1	0,56	16,67	9,34	1,03
Total				17.215,87	1.893,75

9.2. Personal

La manipulación a realizar durante el proceso no requiere de mano de obra especializada en exceso, ya que las únicas tareas del operario serán el movimiento de la grúa y la supervisión de los tiempos y temperaturas, para asegurarse de que no hay errores. Sin embargo, sí sería recomendable que dicho operario contase con nociones básicas de química y seguridad industrial, al menos con lo relacionado al proceso. Además, se establece un tiempo de funcionamiento del proceso de 1,25 horas diarias, es decir, por cada 50 kg de plástico. Con todo ello, el precio de la mano de obra queda reflejado en la **Tabla 20**.

Tabla 20. Costes de personal del proceso.

Concepto	Unidades	Salario base (€·h ⁻¹)	Tiempo trabajo (h·tn ⁻¹)	Coste total (€·tn ⁻¹)
Operario especializado	1	12,75	25	318,75
Total				318,75

9.3. Reactivos

En este apartado se tiene en cuenta toda el agua utilizada durante el proceso completo (mezcla, limpieza, calentamiento y ducha), así como el volumen de alcohol utilizado para el tratamiento. En la **Tabla 21** se recogen los costes calculados de los reactivos necesarios durante el proceso.

Tabla 21. Costes de reactivos del proceso

Concepto	Volumen (m ³ ·tn ⁻¹)	Precio (€·m ⁻³)	Coste total (€·tn ⁻¹)
Agua de red	421	0,57	239,9
Éter metílico de dipropilenglicol	2,03	2.710	5.501,3
Total			5.741,27

9.4. Varios

Para los costes de imprevistos se establece un coste igual al 10% del coste general del proceso, lo que permitiría suplir la gran mayoría de problemas que pudiesen surgir. Este coste queda detallado en la **Tabla 22**:

Tabla 22. Costes varios del proceso.

Concepto	Unidades	Coste proceso (€·tn ⁻¹)	Coste total (€·tn ⁻¹)
Varios	0,1	7.926,77	792,68
Total			792,68

9.5. Resumen

Una vez establecidos el conjunto de los costes del proceso, se detalla el coste total en la **Tabla 23**. Además del coste por tonelada se ha añadido el coste anual. Este coste es directamente proporcional al coste por tonelada, ya que a lo largo de un año completo se tratan un total de 18,25 toneladas.

Tabla 23. Costes totales anuales y por tonelada.

Concepto	Coste total (€·tn ⁻¹)	Coste total (€·año ⁻¹)
Energía	1.893,75	34.560,94
Personal	318,75	5.817,19
Reactivos	5.741,27	104.778,18
Varios	792,68	14.466,41
Total	8746,45	159.622,71

El coste final del tratamiento de una tonelada de plástico es de **ocho mil setecientos cuarenta y seis euros con cuarenta y cinco céntimos**.

10. CONCLUSIONES GENERALES

En este trabajo de fin de grado se ha estudiado un proceso de eliminación de olores en residuos plásticos para su posterior reutilización, para el que se ha comprobado la efectividad de distintas sustancias: agua de red, detergente y éter metílico de dipropilenglicol. Además, se ha valorado el efecto de los parámetros de temperatura, tiempo de mezclado y de calentamiento y concentración en el tratamiento para cada una de las sustancias. En base a los resultados obtenidos durante los ensayos a escala de laboratorio, se ha realizado el diseño y estudio económico del proceso a escala industrial. Con la información mostrada en los apartados anteriores, se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- El éter metílico de dipropilenglicol elimina eficazmente los contaminantes causantes del olor de los plásticos, al contrario que el agua y el detergente, que han demostrado ser insuficientes por sí solos.
- Las condiciones de trabajo son muy dependientes de la concentración de alcohol utilizada, siendo menos exigentes cuánto mayor es. Por otra parte, la efectividad del tratamiento aumenta con la temperatura y el tiempo.
- Se ha diseñado un proceso discontinuo a escala industrial teniendo en cuenta los resultados de laboratorio mediante un estudio estadístico y con las condiciones óptimas de operación seleccionadas a partir de la realización de un estudio económico. Las estimaciones del proceso prevén costes muy elevados para éste, sobre todo en comparación con el bajo coste de compra del plástico virgen, por lo que para aumentar la rentabilidad económica ha sido necesario plantear la reutilización del alcohol tras un tratamiento, ya que es el que supone un mayor coste, suponiendo casi un 90% del precio final del tratamiento completo.
- Para asegurar la efectividad del tratamiento a escala industrial y aumentar el rendimiento del proceso, tanto para los reactivos como energéticamente, sería necesario desarrollar una planta piloto a mayor escala respecto a los ensayos de laboratorio.

11. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Recytrans, «Recytras,» 09 Julio 2013. [En línea]. Available: <https://www.recytrans.com/blog/jerarquia-de-residuos/>. [Último acceso: 14 Mayo 2019].
- [2] ONU, «un.org,» [En línea]. Available: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/sustainable-consumption-production/>. [Último acceso: 14 Mayo 2019].
- [3] Ministerio de Sanidad, Política Social e Igualdad, «BOE,» 30 Noviembre 2015. [En línea]. Available: <https://www.boe.es/buscar/pdf/2011/BOE-A-2011-11827-consolidado.pdf>. [Último acceso: 14 Mayo 2019].
- [4] M. E. Raffino, «Concepto.de,» 26 Noviembre 2018. [En línea]. Available: <https://concepto.de/plastico/>. [Último acceso: 05 Mayo 2019].
- [5] H. Ritchie y M. Roser, «Our World in Data,» Septiembre 2018. [En línea]. Available: <https://ourworldindata.org/plastic-pollution>. [Último acceso: 24 Abril 2019].
- [6] R. Geyer, J. R. Jambeck y K. L. Law, «Production, use, and fate of all plastics ever made,» *Science Advances*, nº 3, 19 Julio 2017.
- [7] Greenpeace, «Greenpeace,» [En línea]. Available: <https://es.greenpeace.org/es/trabajamos-en/consumismo/plasticos/como-llega-el-plastico-a-los-oceanos-y-que-sucedee-entonces/>. [Último acceso: 14 Mayo 2019].
- [8] RTVE, «RTVE,» 19 Marzo 2019. [En línea]. Available: <http://www.rtve.es/noticias/20190319/plastico-reciclado-supera-se-arroja-vertederos-primera-vez-espana/1905285.shtml>. [Último acceso: 05 Mayo 2019].
- [9] ifyda consultores, «ifydaconsultores,» 15 Septiembre 2016. [En línea]. Available: <https://ifydaconsultores.com/legislacion-sobre-envases-plasticos-alimentarios/>. [Último acceso: 14 Mayo 2019].
- [10] Cicloplast, «Cicloplast,» [En línea]. Available: <http://www.cicloplast.com/index.php?accion=ruta-del-reciclado&subAccion=reciclado-envases>. [Último acceso: 05 Mayo 2019].
- [11] Ecoticias, «Top 5 de las empresas que más impulsan la economía circular en España,» 2018.

- [12] Servicio Limpieza, «Servicio Limpieza,» 10 Junio 2016. [En línea]. Available: <http://serviciolimpiezacasas.blogspot.com/2016/06/proceso-de-reciclaje-de-plastico.html>. [Último acceso: 14 Mayo 2019].
- [13] G. Wypych, Handbook of Odors in Plastic Materials, ChemTec Publishing, 2017.
- [14] M. Ashis S. Gupta y J. T. Camp, «PROCESS FOR THE EXTRACTION OF CONTAMINANTS FROM PLASTICS». Atalanta, EE.UU. Patente 4680060, 14 Julio 1987.
- [15] T. J. Nielsen, «Limonene and Myrcene Sorption into Refillable Polyethylene Terephthalate Bottles, and Washing Effects on Removal of Sorbed Compounds,» *Journal of Food Science*, vol. 59, nº 1, pp. 226-230, 1994.
- [16] A. Dieser y C. Nettig, «Compositions for removal of odors». US Patente US 2012/0058072 A1, 08 Marzo 2012.
- [17] M. Strangl, T. Fell, M. Schlummer, A. Maeurer y A. Buettner, «Characterization of odorous contaminants in post-consumer plastic packaging waste using multidimensional gas chromatographic separation coupled with olfactometric resolution,» *Journal of Separation Science*, vol. 40, nº 7, pp. 7-17, 2017.
- [18] Ajuntament de València, «valencia.es,» 10 Febrero 2016. [En línea]. Available: [https://www.valencia.es/twav/ordenanzas.nsf/resultadoOrd/E13BC213CF5BA3F2C1256F9400309121/\\$file/O_Saneamiento_Dic2015.pdf](https://www.valencia.es/twav/ordenanzas.nsf/resultadoOrd/E13BC213CF5BA3F2C1256F9400309121/$file/O_Saneamiento_Dic2015.pdf). [Último acceso: 14 Mayo 2019].
- [19] Dalli-group, «Dalli-group,» [En línea]. Available: https://detergents.lidl-info.com/daten/Win%20Cosmetic_20439804_Formil%20Superkonzentrat%20VWM%2011.pdf. [Último acceso: 25 Abril 2019].
- [20] HACH LANGE ESPAÑA, «Crisoninstruments,» [En línea]. Available: <http://www.crisoninstruments.com/es/laboratorio/medidor-de-ph-/medidor-de-ph-de-sobremesa/Medidor-pH-glp-21>. [Último acceso: 14 Mayo 2019].
- [21] HACH LANGE SPAIN, «Crisoninstruments,» [En línea]. Available: <http://www.crisoninstruments.com/es/laboratorio/conductimetro/de-sobremesa/ec-metro-glp-31>. [Último acceso: 14 Mayo 2019].
- [22] DINKO Instruments, «DINKO,» [En línea]. Available: http://www.dinko.es/es/turbid%C3%ADmetros_2212. [Último acceso: 14 Mayo 2019].

- [23] Wikipedia, «Wikipedia,» [En línea]. Available: https://es.wikipedia.org/wiki/Demanda_qu%C3%ADmica_de_ox%C3%ADgeno. [Último acceso: 14 Mayo 2019].
- [24] MERCK, «Merckmillipore,» [En línea]. Available: http://www.merckmillipore.com/ES/es/product/COD-Cell-Test,MDA_CHEM-114541#relations. [Último acceso: 14 Mayo 2019].
- [25] MERCK, «Merckmillipore,» [En línea]. Available: http://www.merckmillipore.com/ES/es/product/COD-Cell-Test,MDA_CHEM-114555. [Último acceso: 14 Mayo 2019].
- [26] MERCK, «vwr,» [En línea]. Available: <http://www.crisoninstruments.com/es/laboratorio/medidor-de-ph-/medidor-de-ph-de-sobremesa/Medidor-pH-glp-21>. [Último acceso: 14 Mayo 2019].
- [27] MERCK, «VidraFOC,» [En línea]. Available: <https://www.vidrafoc.com/fotometro-spectroquantr-nova-30a-merck.html>. [Último acceso: 14 Mayo 2019].
- [28] CheCalc, «CheCalc,» 2015. [En línea]. Available: <https://checalc.com/index.html>. [Último acceso: 03 Mayo 2019].
- [29] Dorsan Filtration, «dorsanfiltration,» [En línea]. Available: <https://www.dorsanfiltration.com/prod/papel-filtro/>. [Último acceso: 26 05 2019].
- [30] Ygnis, «ygnis,» [En línea]. Available: <https://www.ygnis.es/content/download/3143/21070/version/2/file/Cat%C3%A1logo%20Ygnis%202016.pdf>. [Último acceso: 30 Mayo 2019].
- [31] Grundfos, «Grundfos,» [En línea]. Available: <https://es.grundfos.com/>. [Último acceso: 17 Mayo 2019].
- [32] Grundfos, «Grundfos,» [En línea]. Available: https://product-selection.grundfos.com/product-detail.sizing-result.html?from_suid=155924253085708679902792252543&pumpssystemid=580241174&qcid=580241208. [Último acceso: 17 Mayo 2019].
- [33] Mixer Direct, «Mixerdirect,» [En línea]. Available: <https://www.mixerdirect.com/collections/20-1000-gallon-mixers/products/3-4-hp-variable-speed-gear-drive-heavy-duty-clamp-mount>. [Último acceso: 16 Mayo 2019].

- [34] F. Francisco Galván, «Ambientalys,» [En línea]. Available: <https://www.ambientalys.com/canon-de-saneamiento>. [Último acceso: 03 Mayo 2019].
- [35] «Tarifadeluz.com,» [En línea]. Available: <http://www.tarifadeluz.com/index.php>. [Último acceso: 03 Mayo 2019].
- [36] The Engineering Tool Box, «Engineeringtoolbox,» [En línea]. Available: https://www.engineeringtoolbox.com/water-liquid-gas-thermal-conductivity-temperature-pressure-d_2012.html. [Último acceso: 18 Mayo 2019].
- [37] Samchem Prasadha, «Samchem Prasadha,» [En línea]. Available: http://samchemprasadha.com/images/catalog/dipropylene_glycol_methyl_ether.pdf. [Último acceso: 03 Mayo 2019].
- [38] UPV, Colección de tablas y gráficos de termodinámica, 2019.
- [39] Carl Roth, «Carl Roth,» 04 Abril 2016. [En línea]. Available: https://www.carlroth.com/downloads/sdb/es/7/SDB_7656_ES_ES.pdf. [Último acceso: 29 Abril 2019].
- [40] Sigma Aldrich, «Sigma Aldrich,» [En línea]. Available: <https://www.sigmaaldrich.com/catalog/search?term=8185332500&interface=All&N=0&mode=match%20partialmax&lang=es®ion=ES&focus=product>. [Último acceso: 03 Mayo 2019].
- [41] Aimplas, «Aimplas,» 23 Marzo 2018. [En línea]. Available: <https://www.aimplas.es/blog/plastico-reciclado-en-aplicaciones-de-contacto-con-alimentos-una-nueva-oportunidad-de-negocio/>. [Último acceso: 05 Mayo 2019].
- [42] ECOTicias, «ECOTicias,» 04 Enero 2010. [En línea]. Available: <https://www.ecoticias.com/residuos-reciclaje/21178/Reciclado-de-Plasticos-Como-se-Reciclan>. [Último acceso: 05 Mayo 2019].
- [43] La Red, Reciclados plásticos, «RecicladosLaRed,» [En línea]. Available: <http://www.recicladoslared.es/proceso-de-reciclaje-de-plasticos/>. [Último acceso: 05 Mayo 2019].
- [44] Wikipedia, «Wikipedia,» [En línea]. Available: https://es.wikipedia.org/wiki/Reciclado_de_pl%C3%A1stico. [Último acceso: 05 Mayo 2019].
- [45] Vivir Sin Plástico, «Vivir Sin Plástico,» 11 Septiembre 2016. [En línea]. Available: <https://vivirsinplastico.com/como-funciona-el-reciclaje-en-espana/>. [Último acceso: 05 Mayo 2019].

- [46] M. H. Fairchild, «Plastic Bottle Cleaner». US Patente 4434069, 28 Julio 1982.
- [47] B. S. Anouar, C. Guinot, J.-C. Ruiz, F. Charton, P. Dole, C. Joly y C. Yvan, «Purification of post-consumer polyolefins via supercritical CO₂ extraction for the recycling in food contact applications,» *The Journal of Supercritical Fluids*, vol. 98, pp. 25-32, 2015.
- [48] Buderus, «Buderus,» [En línea]. Available:
https://www.buderus.es/files/Medianas_y_grandes_Buderus_Catalogo_Tarifa_General_2015_ES.pdf. [Último acceso: 19 Mayo 2019].

ANEXO I: FICHAS DE SEGURIDAD

ficha de datos de seguridad

conforme al Reglamento (CE) no 1907/2006 (REACH) modificado por 2015/830/UE



Dipropilenglicol monometiléter ≥98%, pure

número de artículo: **7656**
Versión: **1.0 es**

fecha de emisión: 04.04.2016

SECCIÓN 1: Identificación de la sustancia o la mezcla y de la sociedad o la empresa

1.1 Identificador del producto

Identificación de la sustancia	Dipropilenglicol monometiléter
Número de artículo	7656
Número de registro (REACH)	01-2119450011-60-xxxx
Número CE	252-104-2
Número CAS	34590-94-8

1.2 Usos pertinentes identificados de la sustancia o de la mezcla y usos desaconsejados

Usos identificados: producto químico de laboratorio

1.3 Datos del proveedor de la ficha de datos de seguridad

Carl Roth GmbH + Co KG
Schoemperlenstr. 3-5
D-76185 Karlsruhe
Alemania

Teléfono: +49 (0) 721 - 56 06 0

Fax: +49 (0) 721 - 56 06 149

e-mail: sicherheit@carlroth.de

Sitio web: www.carlroth.de

Persona competente responsable de la ficha de datos de seguridad : Department Health, Safety and Environment

e-mail (persona competente) : sicherheit@carlroth.de

1.4 Teléfono de emergencia

Servicios de información para casos de emergencia **Poison Centre Munich: +49/(0)89 19240**

SECCIÓN 2: Identificación de los peligros

2.1 Clasificación de la sustancia o de la mezcla

Clasificación según el Reglamento (CE) no 1272/2008 (CLP)

Esta sustancia no reúne los criterios para ser clasificada conforme a el Reglamento no 1272/2008/CE.

2.2 Elementos de la etiqueta

Etiquetado según el Reglamento (CE) no 1272/2008 (CLP)

no es necesario

Palabra de advertencia no es necesario

2.3 Otros peligros

No hay información adicional.

ficha de datos de seguridad

conforme al Reglamento (CE) no 1907/2006 (REACH) modificado por 2015/830/UE



Dipropilenglicol monometiléter ≥98%, pure

número de artículo: **7656**

SECCIÓN 3: Composición/información sobre los componentes

3.1 Sustancias

Nombre de la sustancia	(metil-2-metoxietoxi)propanol
Número de registro (REACH)	01-2119450011-60-xxxx
Número CE	252-104-2
Número CAS	34590-94-8
Fórmula molecular	C ₇ H ₁₆ O ₃
Masa molar	148,2 g/mol

SECCIÓN 4: Primeros auxilios

4.1 Descripción de los primeros auxilios



Notas generales

Quitar las prendas contaminadas.

En caso de inhalación

Proporcionar aire fresco. Si aparece malestar o en caso de duda consultar a un médico.

En caso de contacto con la piel

Aclararse la piel con agua/ ducharse.

En caso de contacto con los ojos

Aclarar cuidadosamente con agua durante varios minutos. Si aparece malestar o en caso de duda consultar a un médico.

En caso de ingestión

Enjuagarse la boca. Llamar a un médico si la persona se encuentra mal.

4.2 Principales síntomas y efectos, agudos y retardados

Cefalea, Vértigo, Narcosis

4.3 Indicación de toda atención médica y de los tratamientos especiales que deban dispensarse inmediatamente

ninguno

ficha de datos de seguridad

conforme al Reglamento (CE) no 1907/2006 (REACH) modificado por 2015/830/UE



Dipropilenglicol monometiléter ≥98%, pure

número de artículo: **7656**

SECCIÓN 5: Medidas de lucha contra incendios

5.1 Medios de extinción

Medios de extinción apropiados

Coordinar las medidas de extinción con los alrededores
agua pulverizada, espuma, polvo extinguidor seco, dióxido de carbono (CO₂)

Medios de extinción no apropiados

chorro de agua

5.2 Peligros específicos derivados de la sustancia o la mezcla

Combustible. Vapores pueden formar con aire una mezcla explosiva.

Productos de combustión peligrosos

En caso de incendio pueden formarse: monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO₂)

5.3 Recomendaciones para el personal de lucha contra incendios

Los vapores son más pesados que el aire. Luchar contra el incendio desde una distancia razonable, tomando las precauciones habituales. Llevar un aparato de respiración autónomo.

SECCIÓN 6: Medidas en caso de vertido accidental

6.1 Precauciones personales, equipo de protección y procedimientos de emergencia

Para el personal que no forma parte de los servicios de emergencia

No son necesarias medidas especiales.

6.2 Precauciones relativas al medio ambiente

Manteniendo el producto alejado de los desagües y de las aguas superficiales y subterráneas.

6.3 Métodos y material de contención y de limpieza

Consejos sobre la manera de contener un vertido

Cierre de desagües.

Otras indicaciones relativas a los vertidos y las fugas

Colocar en recipientes apropiadas para su eliminación. Ventilar la zona afectada.

Referencia a otras secciones

Productos de combustión peligrosos: véase sección 5. Equipo de protección personal: véase sección 8. Materiales incompatibles: véase sección 10. Consideraciones relativas a la eliminación: véase sección 13.

SECCIÓN 7: Manipulación y almacenamiento

7.1 Precauciones para una manipulación segura

Evitar: Formación de aerosol y niebla. Asegurar una ventilación adecuada. Mantenga el envase bien cerrado cuando no lo use.

- **Medidas de prevención de incendios, así como las destinadas a impedir la formación de partículas en suspensión y polvo**



Conservar alejado de toda llama o fuente de chispas - No fumar.

ficha de datos de seguridad

conforme al Reglamento (CE) no 1907/2006 (REACH) modificado por 2015/830/UE



Dipropilenglicol monometiléter ≥98%, pure

número de artículo: 7656

Recomendaciones sobre medidas generales de higiene en el trabajo

Lavar las manos antes de las pausas y al fin del trabajo.

7.2 Condiciones de almacenamiento seguro, incluidas posibles incompatibilidades

Almacenar en un lugar bien ventilado. Mantener el recipiente cerrado herméticamente.

Sustancias o mezclas incompatibles

Observe el almacenamiento compatible de productos químicos.

Atención a otras indicaciones

• Requisitos de ventilación

Utilización de ventilación local y general.

• Diseño específico de locales o depósitos de almacenamiento

Temperatura de almacenaje recomendada: 15 - 25 °C.

7.3 Usos específicos finales

No existen informaciones.

SECCIÓN 8: Controles de exposición/protección individual

8.1 Parámetros de control

Valores límites nacionales

Valores límites de exposición profesional (límites de exposición en el lugar de trabajo)

País	Nombre del agente	No CAS	Anotación	Identificador	VLA-ED [ppm]	VLA-ED [mg/m ³]	VLA-EC [ppm]	VLA-EC [mg/m ³]	Fuente
ES	éter metílico de dipropilenglicol	34590-94-8		VLA	50	308			INSHT
EU	(2-metoximetiletoxi)propanol	34590-94-8		IOELV	50	308			2000/39/CE

Anotación

VLA-EC Valor límite ambiental-exposición de corta duración (nivel de exposición de corta duración): valor límite a partir del cual no debe producirse ninguna exposición y que hace referencia a un periodo de 15 minutos, salvo que se disponga lo contrario

VLA-ED Valor límite ambiental-exposición diaria (límite de exposición de larga duración): tiempo medido o calculado en relación con un período de referencia de una media ponderada en el tiempo de ocho horas

DNEL/DMEL/PNEC pertinentes y otros niveles umbrales

• valores relativos a la salud humana

Parámetro	Niveles umbrales	Objetivo de protección, vía de exposición	Utilizado en	Tiempo de exposición
DNEL	308 mg/m ³	humana, por inhalación	trabajadore (industrial)	crónico - efectos sistémicos
DNEL	283 mg/kg pc/día	humana, cutánea	trabajadore (industrial)	crónico - efectos sistémicos

ficha de datos de seguridad

conforme al Reglamento (CE) no 1907/2006 (REACH) modificado por 2015/830/UE



Dipropilenglicol monometiléter ≥98%, pure

número de artículo: 7656

• valores medioambientales

Parámetro	Niveles umbrales	Compartimento ambiental	Tiempo de exposición
PNEC	19 mg/l	agua dulce	corto plazo (ocasión única)
PNEC	1,9 mg/l	agua marina	corto plazo (ocasión única)
PNEC	4.168 mg/l	depuradora de aguas residuales (STP)	corto plazo (ocasión única)
PNEC	70,2 mg/kg	sedimentos de agua dulce	corto plazo (ocasión única)
PNEC	7,02 mg/kg	sedimentos marinos	corto plazo (ocasión única)
PNEC	2,74 mg/kg	suelo	corto plazo (ocasión única)

8.2 Controles de exposición

Medidas de protección individual (equipo de protección personal)



Protección de los ojos/la cara

Utilizar gafas de protección con con protección a los costados.

Protección de la piel

• protección de las manos

Úsense guantes adecuados. Adecuado es un guante de protección química probado según la norma EN 374.

• tipo de material

NBR (Goma de nitrilo)

• espesor del material

0,4 mm.

• tiempo de penetración del material con el que están fabricados los guantes

>480 minutos (permeación: nivel 6)

• otras medidas de protección

Hacer períodos de recuperación para la regeneración de la piel. Protectores de la piel preventivos (cremas de protección/pomadas) están recomendados.

Protección respiratoria

Protección respiratoria es necesaria para: Formación de aerosol y niebla. Tipo: A (contra gases y vapores orgánicos con un punto de ebullición de > 65°C, código de color: marrón).

Controles de exposición medioambiental

Manteniendo el producto alejado de los desagües y de las aguas superficiales y subterráneas.

ficha de datos de seguridad

conforme al Reglamento (CE) no 1907/2006 (REACH) modificado por 2015/830/UE



Dipropilenglicol monometiléter ≥98%, pure

número de artículo: **7656**

SECCIÓN 9: Propiedades físicas y químicas

9.1 Información sobre propiedades físicas y químicas básicas

Aspecto

Estado físico	líquido (fluído)
Color	incolor
Olor	débilmente perceptible
Umbral olfativo	No existen datos disponibles

Otros parámetros físicos y químicos

pH (valor)	6 - 7 (agua: 200 g/l, 20 °C)
Punto de fusión/punto de congelación	-83 °C
Punto inicial de ebullición e intervalo de ebullición	190 °C
Punto de inflamación	75 °C (vaso cerrado)
Tasa de evaporación	no existen datos disponibles
Inflamabilidad (sólido, gas)	no relevantes (fluído)
<u>Límites de explosividad</u>	
• límite inferior de explosividad (LIE)	1,1 % vol
• límite superior de explosividad (LSE)	14 % vol
Límites de explosividad de nubes de polvo	no relevantes
Presión de vapor	0,4 hPa a 20 °C
Densidad	0,95 g/cm ³ a 20 °C
Densidad de vapor	5,11 (aire = 1)
Densidad aparente	No es aplicable
Densidad relativa	Las informaciones sobre esta propiedad no están disponibles.
<u>Solubilidad(es)</u>	
Hidrosolubilidad	no existen datos disponibles
<u>Coeficiente de reparto</u>	
n-octanol/agua (log KOW)	0,004 (25 °C) (ECHA)
Temperatura de auto-inflamación	207 °C - ECHA
Temperatura de descomposición	no existen datos disponibles
<u>Viscosidad</u>	
• viscosidad cinemática	4,55 mm ² /s a 20 °C
• viscosidad dinámica	3,7 mPa s a 25 °C
Propiedades explosivas	no se clasificará como explosiva
Propiedades comburentes	ninguno

ficha de datos de seguridad

conforme al Reglamento (CE) no 1907/2006 (REACH) modificado por 2015/830/UE



Dipropilenglicol monometiléter ≥98%, pure

número de artículo: 7656

9.2 Otros datos

No hay información adicional.

SECCIÓN 10: Estabilidad y reactividad

10.1 Reactividad

Calentando: Vapores pueden formar con aire una mezcla explosiva.

10.2 Estabilidad química

Puede formar peróxidos explosivos.

10.3 Posibilidad de reacciones peligrosas

Reacciones fuertes con: Muy comburente

10.4 Condiciones que deben evitarse

Conservar alejado del calor.

10.5 Materiales incompatibles

No hay información adicional.

10.6 Productos de descomposición peligrosos

Peróxidos.

SECCIÓN 11: Información toxicológica

11.1 Información sobre los efectos toxicológicos

Toxicidad aguda

No se clasificará como toxicidad aguda.

Vía de exposición	Parámetro	Valor	Especie	Fuente
oral	LD50	>5.000 mg/kg	rata	ECHA
cutánea	LD50	9.510 mg/kg	conejo	ECHA

Corrosión o irritación cutánea

No se clasificará como corrosivo/irritante para la piel.

Lesiones oculares graves o irritación ocular

No se clasificará como causante de lesiones oculares graves o como irritante ocular.

Sensibilización respiratoria o cutánea

No se clasificará como sensibilizante respiratoria o sensibilizante cutánea.

Resumen de la evaluación de las propiedades CMR

No se clasificará como mutágeno en células germinales, carcinógeno ni tóxico para la reproducción

• Toxicidad específica en determinados órganos - exposición única

No se clasifica como tóxico específico en determinados órganos (exposición única).

• Toxicidad específica en determinados órganos - exposición repetida

No se clasifica como tóxico específico en determinados órganos (exposición repetida).

ficha de datos de seguridad

conforme al Reglamento (CE) no 1907/2006 (REACH) modificado por 2015/830/UE



Dipropilenglicol monometiléter ≥98%, pure

número de artículo: 7656

Peligro por aspiración

No se clasifica como peligroso en caso de aspiración.

Síntomas relacionados con las características físicas, químicas y toxicológicas

• En caso de ingestión

no se dispone de datos

• En caso de contacto con los ojos

causa irritación de ligera a moderada

• En caso de inhalación

cefalea, vértigo, narcosis

• En caso de contacto con la piel

Contacto frecuente y continuo con la piel puede causar irritaciones de piel, riesgo de penetración cutánea

Otros datos

Ninguno

SECCIÓN 12: Información ecológica

12.1 Toxicidad

según 1272/2008/CE: No se clasificará como peligroso para el medio ambiente acuático.

Toxicidad acuática (aguda)

Parámetro	Valor	Especie	Fuente	Tiempo de exposición
LC50	>1.000 mg/l	guppy (Poecilia reticulata)	ECHA	96 horas
LC50	1.919 mg/l	daphnia magna	ECHA	48 horas
ErC50	>969 mg/l	Pseudokirchneriella subcapitata	ECHA	72 horas

Toxicidad acuática (crónica)

Parámetro	Valor	Especie	Fuente	Tiempo de exposición
LC50	>1.000 mg/l	invertebrados acuáticos	ECHA	24 h
NOEC	>0,5 mg/l	invertebrados acuáticos	ECHA	22 d
LOEC	0,5 mg/l	invertebrados acuáticos	ECHA	22 d
crecimiento (CEbx) 10%	4.168 mg/l	microorganismos	ECHA	18 h

12.2 Procesos de degradación

La sustancia es fácilmente biodegradable.

Demanda Teórica de Oxígeno: 2,051 mg/mg

Dióxido de Carbono Teórico: 2,079 mg/mg

Demanda Bioquímica de Oxígeno: 650 mg/g a 20 h

ficha de datos de seguridad

conforme al Reglamento (CE) no 1907/2006 (REACH) modificado por 2015/830/UE



Dipropilenglicol monometiléter ≥98%, pure

número de artículo: 7656

Proceso	Velocidad de degradación	Tiempo
biótico/abiótico	96 %	28 d
desaparición de oxígeno	75 %	10 d
pérdida de COD	96 %	28 d
generación de dióxido de carbono	76 %	28 d

12.3 Potencial de bioacumulación

Se enriquece en organismos insignificadamente.

n-octanol/agua (log KOW) 0,004 (25 °C)

12.4 Movilidad en el suelo

No se dispone de datos.

12.5 Resultados de la valoración PBT y mPmB

No se dispone de datos.

12.6 Otros efectos adversos

Ligeramente peligroso para el agua.

SECCIÓN 13: Consideraciones relativas a la eliminación

13.1 Métodos para el tratamiento de residuos

Contactar al eliminador aprobado correspondiente para una eliminación de residuos.

Información pertinente para el tratamiento de las aguas residuales

No tirar los residuos por el desagüe.

13.2 Disposiciones sobre prevención de residuos

La coordinación de los números de clave de los residuos/marcas de residuos según CER hay que efectuarla espedífcamente de ramo y proceso.

13.3 Observaciones

Los residuos se deben clasificar en las categorías aceptadas por los centros locales o nacionales de tratamiento de residuos. Porfavor considerar las disposiciones nacionales o regionales pertinentes.

SECCIÓN 14: Información relativa al transporte

14.1	Número ONU	(no está sometido a las reglamentaciones de transporte)
14.2	Designación oficial de transporte de las Naciones Unidas	no relevantes
14.3	Clase(s) de peligro para el transporte	no relevantes
	Clase	-
14.4	Grupo de embalaje	no relevantes
14.5	Peligros para el medio ambiente	ninguno (no peligroso para el medio ambiente conforme al reglamento para el transporte de mercancías peligrosas)

ficha de datos de seguridad

conforme al Reglamento (CE) no 1907/2006 (REACH) modificado por 2015/830/UE



Dipropilenglicol monometiléter ≥98%, pure

número de artículo: **7656**

14.6 Precauciones particulares para los usuarios

No hay información adicional.

14.7 Transporte a granel con arreglo al anexo II del Convenio MARPOL y del Código IBC

El transporte a granel de la mercancía no esta previsto.

14.8 Información para cada uno de los Reglamentos tipo de las Naciones Unidas

- **Transporte de mercancías peligrosas por carretera, por ferrocarril o por vía navegable (ADR/RID/ADN)**

No está sometido al ADR, RID y al ADN.

- **Código marítimo internacional de mercancías peligrosas (IMDG)**

No está sometido al IMDG.

SECCIÓN 15: Información reglamentaria

15.1 Reglamentación y legislación en materia de seguridad, salud y medio ambiente específicas para la sustancia o la mezcla

Disposiciones pertinentes de la Unión Europea (UE)

- **Reglamento 649/2012/UE relativo a la exportación e importación de productos químicos peligrosos (PIC)**

No incluido en la lista.

- **Reglamento 1005/2009/CE sobre las sustancias que agotan la capa de ozono (SAO)**

No incluido en la lista.

- **Reglamento 850/2004/CE sobre contaminantes orgánicos persistentes (POP)**

No incluido en la lista.

- **Restricciones conforme a REACH, Anexo XVII**

no incluido en la lista

- **Lista de sustancias sujetas a autorización (REACH, Anexo XIV)**

no incluido en la lista

- **Limitación de las emisiones de compuestos orgánicos volátiles debidas al uso de disolventes orgánicos en determinadas pinturas y barnices y en los productos de renovación del acabado de vehículo (2004/42/CE, Directiva Decopaint)**

Contenido de COV 100 %

- **Directiva sobre emisiones industriales (COVs, 2010/75/UE)**

Contenido de COV 100 %

- **Directiva 2011/65/UE sobre restricciones a la utilización de determinadas sustancias peligrosas en aparatos eléctricos y electrónicos (RoHS) - Anexo II**

no incluido en la lista

- **Reglamento 166/2006/CE relativo al establecimiento de un registro europeo de emisiones y transferencias de contaminantes (PRTR)**

no incluido en la lista

ficha de datos de seguridad

conforme al Reglamento (CE) no 1907/2006 (REACH) modificado por 2015/830/UE



Dipropilenglicol monometiléter ≥98%, pure

número de artículo: 7656

Directiva 2000/60/CE por la que se establece un marco comunitario de actuación en el ámbito de la política de aguas

no incluido en la lista

Catálogos nacionales

La sustancia es enumerada en los siguientes inventarios nacionales:

- EINECS/ELINCS/NLP (Europa)
- REACH (Europa)

15.2 Evaluación de la seguridad química

No se ha realizado una evaluación de la seguridad química de esta sustancia.

SECCIÓN 16: Otra información

Abreviaturas y los acrónimos

Abrev.	Descripciones de las abreviaturas utilizadas
2000/39/CE	Directiva de la Comisión por la que se establece una primera lista de valores límite de exposición profesional indicativos en aplicación de la Directiva 98/24/CE del Consejo
ADN	Accord européen relatif au transport international des marchandises dangereuses par voies de navigation intérieures (Acuerdo Europeo sobre Transporte Internacional de Mercancías Peligrosas por Vías Navegables Interiores)
ADR	Accord européen relatif au transport international des marchandises dangereuses par route (Acuerdo europeo relativo al transporte internacional de mercancías peligrosas por carretera)
CAS	Chemical Abstracts Service (número identificador único carente de significado químico)
CLP	Reglamento (CE) no 1272/2008 sobre clasificación, etiquetado y envasado (Classification, Labelling and Packaging) de sustancias y mezclas
CMR	Carcinógeno, Mutágeno o tóxico para la Reproducción
COV	compuestos orgánicos volátiles
DMEL	Derived Minimal Effect Level (nivel derivado con efecto mínimo)
DNEL	Derived No-Effect Level (nivel sin efecto derivado)
EINECS	European Inventory of Existing Commercial Chemical Substances (Catálogo Europeo de Sustancias Químicas Comercializadas)
ELINCS	European List of Notified Chemical Substances (lista europea de sustancias químicas notificadas)
IMDG	International Maritime Dangerous Goods Code (código marítimo internacional de mercancías peligrosas)
INSHT	Límites de Exposición Profesional para Agentes Químicos, INSHT
IOELV	valore límite de exposición profesional indicativo
MARPOL	el convenio internacional para prevenir la contaminación por los buques (abr. de "Marine Pollutant")
mPmB	muy persistente y muy bioacumulable
NLP	No-Longer Polymer (ex-polímero)
PBT	Persistente, Bioacumulable y Tóxico
PNEC	Predicted No-Effect Concentration (concentración prevista sin efecto)
ppm	partes por millón
REACH	Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals (registro, evaluación, autorización y restricción de las sustancias y preparados químicos)
RID	Règlement concernant le transport International ferroviaire des marchandises Dangereuses (Reglamento referente al transporte internacional por ferrocarril de mercancías peligrosas)

ficha de datos de seguridad

conforme al Reglamento (CE) no 1907/2006 (REACH) modificado por 2015/830/UE



Dipropilenglicol monometiléter ≥98%, pure

número de artículo: 7656

Abrev.	Descripciones de las abreviaturas utilizadas
SGA	"Sistema Globalmente Armonizado de clasificación y etiquetado de sustancias químicas" elaborado por Naciones Unidas
VLA	valor límite ambiental
VLA-EC	valor límite ambiental-exposición de corta duración
VLA-ED	valor límite ambiental-exposición diaria

Principales referencias bibliográficas y fuentes de datos

- Reglamento (CE) no 1907/2006 (REACH), modificado por 2015/830/UE
- Reglamento (CE) no 1272/2008 (CLP, UE SGA)

Frasas pertinentes (código y texto completo como se expone en el capítulo 2 y 3)

no relevantes.

Cláusula de exención de responsabilidad

La información en ésta hoja de datos de seguridad corresponden al leal saber de nuestros conocimiento el día de impresión. Las informaciones deben de ser puntos de apoyo para un manejo seguro de productos mencionados en esta hoja de seguridad para el almacenamiento, elaboración, transporte y eliminación. Las indicaciones no se pueden traspasar a otros productos. Mientras el producto sea mezclado o elaborado con otros materiales, las indicaciones de esta hoja de seguridad no se pueden traspasar así al agente nuevo.

DOCUMENTO 2. PLANOS

ÍNDICE DE LOS PLANOS

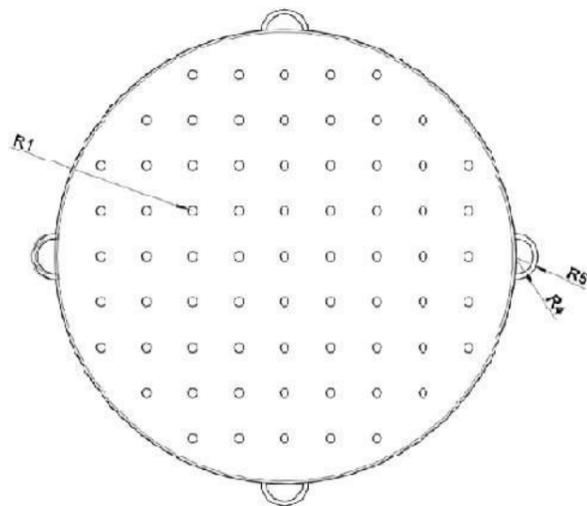
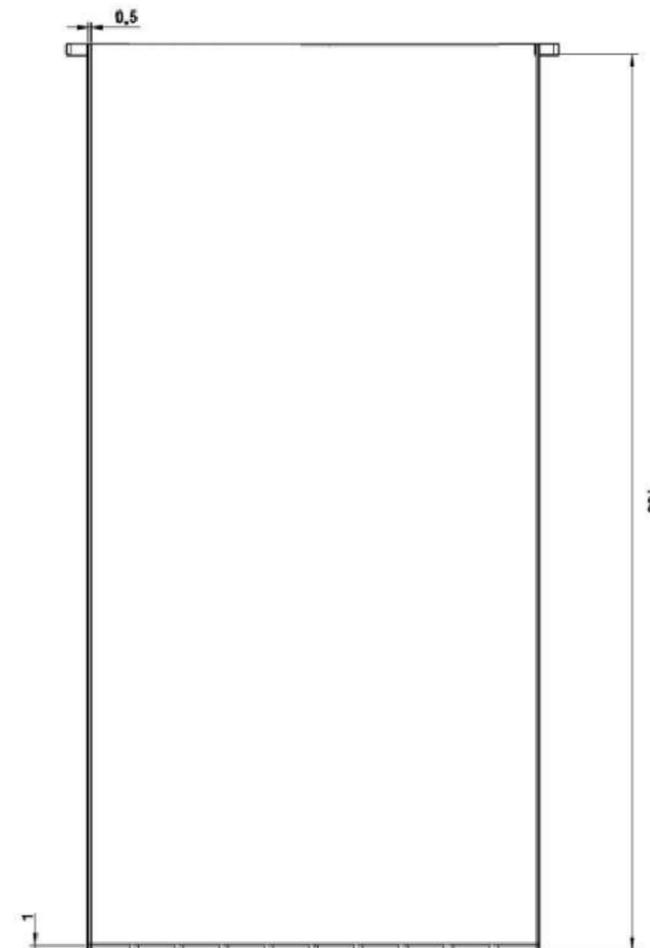
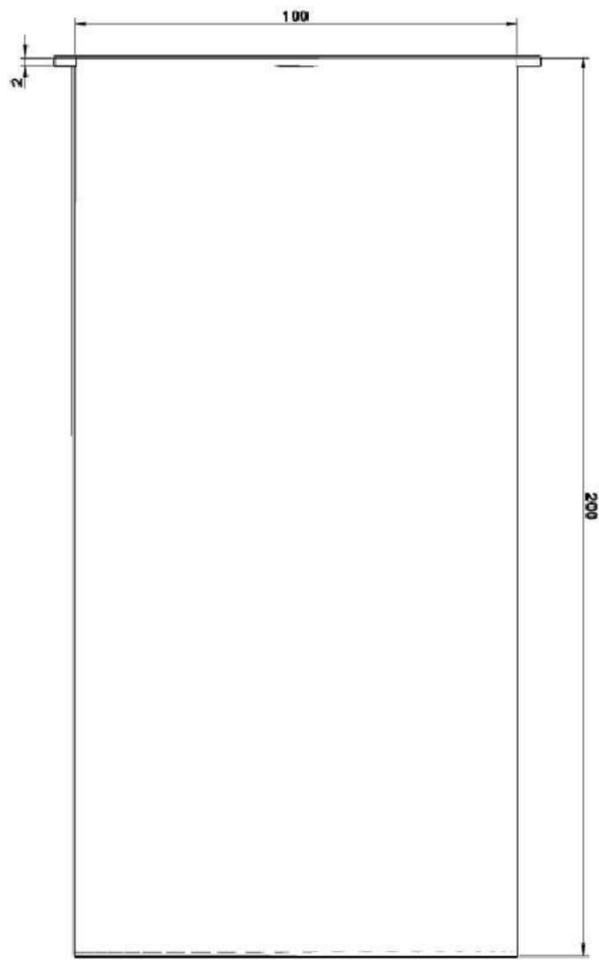
PLANO 1: DIAGRAMA DE FLUJO.....	3
PLANO 2: VISTAS DEL CILINDRO.....	5
PLANO 3: VISTAS DEL TANQUE	7
PLANO 4: DISTRIBUCIÓN EN PLANTA.....	9

PLANO 1: DIAGRAMA DE FLUJO

En el siguiente plano se muestra un diagrama de flujo del proceso, con todos los elementos que participan en el proceso y las conducciones señaladas en distintos colores para su mejor distinción.

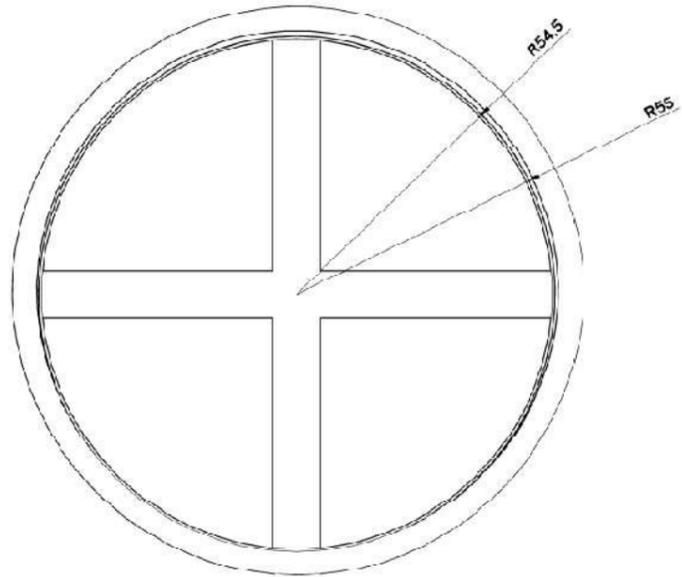
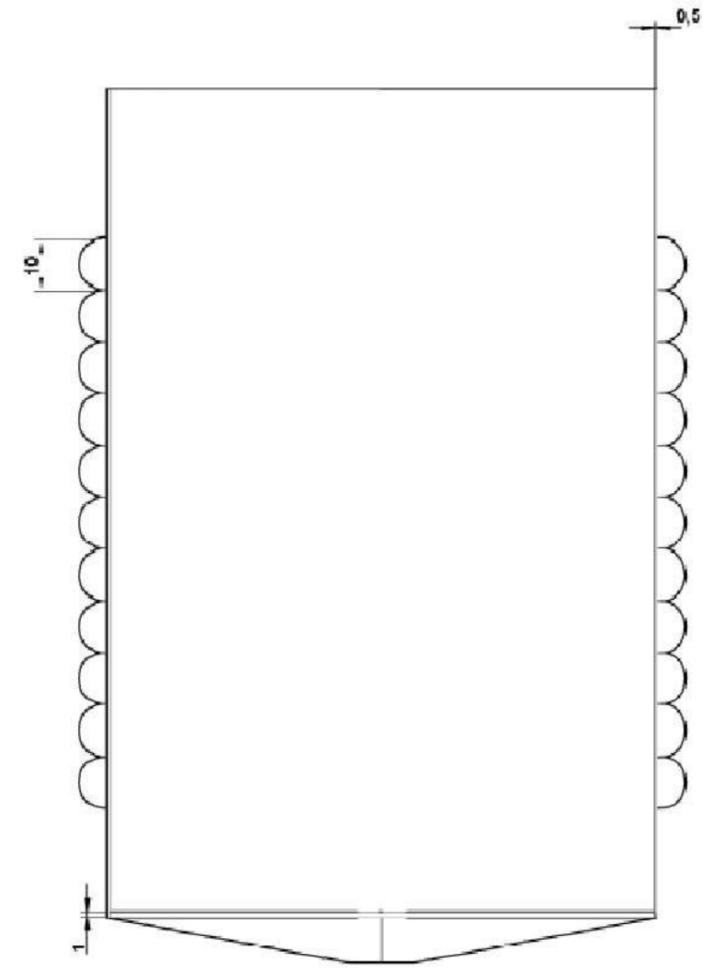
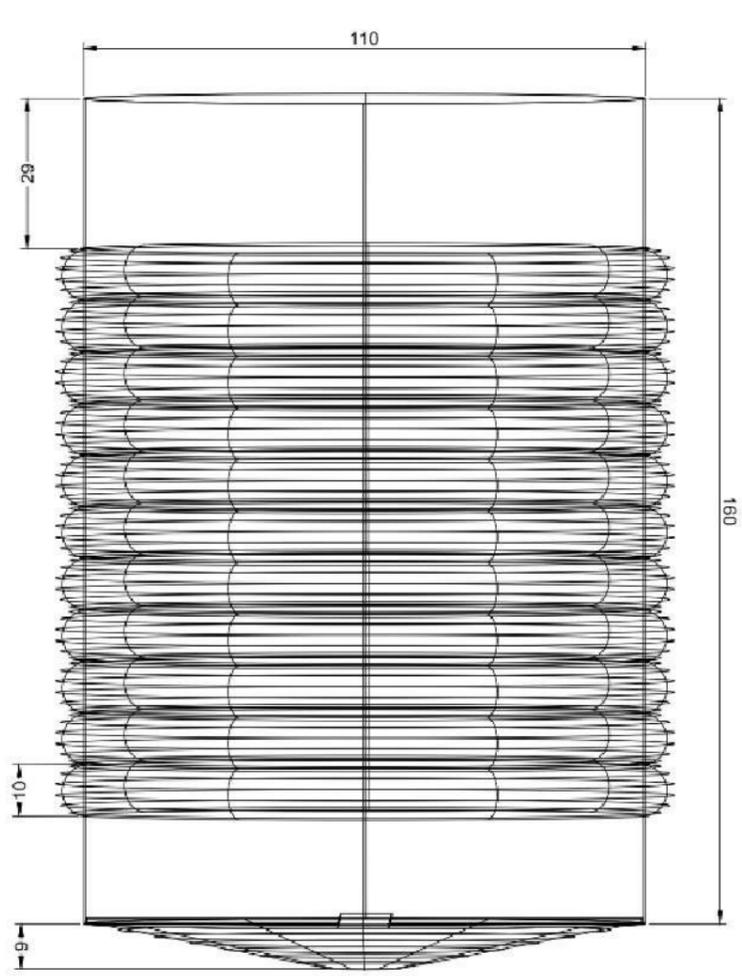
PLANO 2: VISTAS DEL CILINDRO

En el siguiente plano se muestran tres vistas acotadas del cilindro diseñado para transportar los residuos plásticos a lo largo del proceso.



PLANO 3: VISTAS DEL TANQUE

En el siguiente plano se muestran tres vistas acotadas del tanque de mezcla diseñado en el que se realiza el tratamiento con alcohol durante el proceso.



TRABAJO FINAL DE GRADO EN INGENIERÍA QUÍMICA



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



ESCUELA TÉCNICA
SUPERIOR INGENIEROS
INDUSTRIALES VALÈNCIA

Proyecto: ESTUDIO EXPERIMENTAL Y DISEÑO DE UN TRATAMIENTO PARA LA ELIMINACIÓN DE OLORES EN LOS RESIDUOS PLÁSTICOS (50 kg/d) PARA SU POSTERIOR RECICLAJE

Plano: Vistas del tanque de mezcla

Autor: Álvaro Pascual Cordero

Fecha: Junio 2019

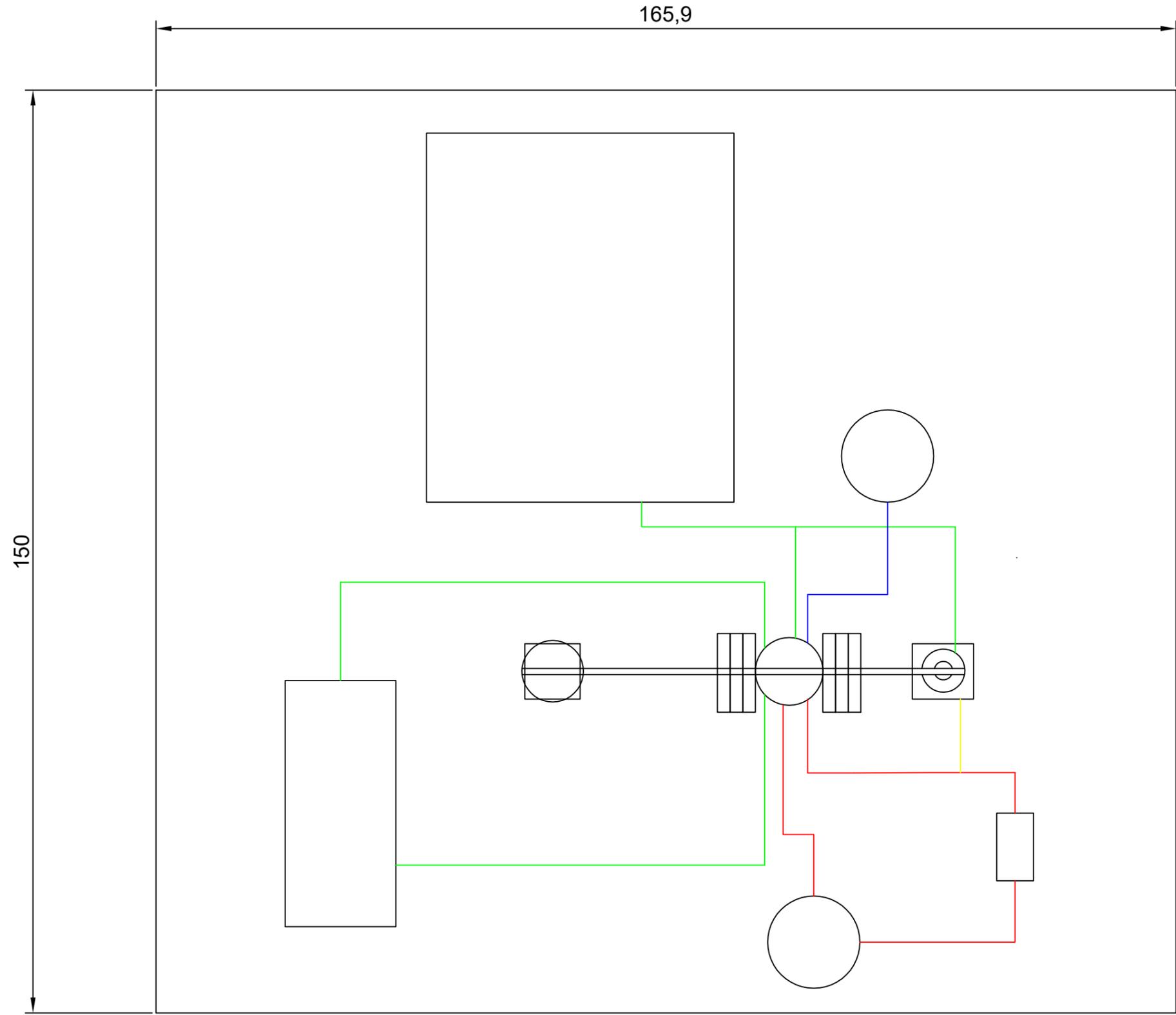
Escala: 1:10

Nº Plano:

3

PLANO 4: DISTRIBUCIÓN EN PLANTA

En el siguiente plano se muestra la propuesta de distribución en planta del proceso, con medidas para determinar el área ocupada.



DOCUMENTO 3. PRESUPUESTO

ÍNDICE DEL PRESUPUESTO

1. PRESUPUESTO PARCIAL.....	5
1.1. Presupuesto de mano de obra	5
1.2. Presupuesto de material	5
2. PRESUPUESTO DE INVERSIÓN	7
3. PRESUPUESTO DE EJECUCIÓN MATERIAL.....	8
4. PRESUPUESTO DE EJECUCIÓN POR CONTRATA.....	8
5. PRESUPUESTO BASE DE LICITACIÓN	9

1. PRESUPUESTO PARCIAL

En la primera parte del presupuesto se determinará el coste de los ensayos de laboratorio y de la redacción del trabajo realizada por el alumno. Así mismo, se realizará un presupuesto de inversión para determinar el coste de la instalación diseñada.

1.1. Presupuesto de mano de obra

Como mano de obra para la realización del TFG se ha tenido en cuenta al alumno que lo ha realizado, el cual se ha considerado ingeniero químico titulado, con un sueldo base de 16 euros a la hora, lo que se refleja en la **Tabla 24**.

Tabla 24. Cuadro de precios de mano de obra.

Concepto	Unidades	Cantidad	Precio unitario (€)	Importe (€)
Ingeniero químico	h	300	17	5100
Total				5100

1.2. Presupuesto de material

En este apartado se incluyen todo lo utilizado durante los ensayos de laboratorio. Se tiene en un cuenta el precio completo de los equipos (**Tabla 25**), sin embargo, en caso de ya contar con los equipos se podrían eliminar de lo presupuestado. También se añaden los reactivos (**Tabla 26**) utilizados al precio al que se adquirieron y los instrumentos de un solo uso (**Tabla 27**). La **Tabla 28** resumen el total del presupuesto de material.

Tabla 25. Cuadro de precios de los equipos utilizados.

Concepto	Unidades	Cantidad	Precio unitario (€)	Importe (€)
pH-Meter GLP 21, Crison	Ud.	1	661	661
TURBIDIMETER D-112, DINKO Instruments	Ud.	1	1.177	1.177
EC-Meter GLP 31, Crison	Ud.	1	762	762
TR300, MERCK	Ud.	1	916	916
Fotómetro Spectroquant Nova 30a, MERK	Ud.	1	4.098	4.098
Baño de agua, Falc	Ud.	1	1.095	1.095
Balanza, Kern	Ud.	1	642	642
Base agitadora, SBS	Ud.	1	272	272
Total				9.623

Tabla 26. Cuadro de precios de los reactivos.

Concepto	Unidades	Cantidad	Precio unitario (€)	Importe (€)
Detergente "Formil Activo"	L	1	3	3
Éter metílico de dipropilenglicol	L	10	31,96	319,6
Total				322,6

Tabla 27. Cuadro de precios de la instrumentación utilizada.

Concepto	Unidades	Cantidad	Precio unitario (€)	Importe (€)
Vaso de precipitados de vidrio 600 mL	Ud.	3	3,50	10,5
Colador	Ud.	1	1	1
Kit DQO 25-1500 mg/L	Ud.	1	114	114
Kit DQO 500-10000 mg/L	Ud.	1	114	114
Rejilla para tubos de ensayo	Ud.	1	12	12
Guantes de látex L	Ud.	30	0,08	2,4
Micropipeta hasta 5 mL	Ud.	1	195	195
Vidrio de reloj	Ud.	1	1	1
Imán agitador magnético	Ud.	1	4	4
Total				453,9

Tabla 28. Cuadro de precios de los materiales.

Concepto	Importe (€)
Equipos	9.623
Reactivos	322,6
Instrumentación	453,9
Total	10.399,5

2. PRESUPUESTO DE INVERSIÓN

En este apartado se estima el coste de construcción e instalación de los equipos detallados en el apartado de diseño (**Tabla 29**), así como la mano de obra necesaria para ello (**Tabla 30**).

Tabla 29. Cuadro de precios de los equipos utilizados.

Concepto	Unidades	Cantidad	Precio unitario (€)	Importe (€)
Tanque encamisado 1,5 m ³	Ud.	1	1.246	1.246
Cilindro 1,5 m ³	Ud.	1	950	950
Ducha	Ud.	1	412	412
Depósito 5 m ³	Ud.	1	500	500
Depósito 1,5 m ³	Ud.	1	350	350
Cisterna de agua 30 m ³	Ud.	1	1.350	1.350
Caldera 10.000 kW	Ud.	1	95.357,56	95.357,56
Depósito abierto 5 m ³	Ud.	1	470	470
Bomba	Ud.	7	2.044	14.308
Agitador	Ud.	1	2.852,4	2.852,4
Filtro de carbón activo	Ud.	1	974,5	974,5
Tolva	Ud.	1	200	200
Manómetro	Ud.	1	25	25
Termómetro	Ud.	6	100	600
Caudalímetro	Ud.	6	120	720
Válvula	Ud.	6	250	1.500
Válvula de tres vías	Ud.	2	500	1.000
Toma de tierra	Ud.	7	10	70
Conexión equipotencial	Ud.	8	2	16
Controlador	Ud.	1	100	100

Tuberías polipropileno	m	52	21,234	1.104,17
Grúa	Ud.	1	1.256	1.256
Total				125.361,63

3. PRESUPUESTO DE EJECUCIÓN MATERIAL

El presupuesto de ejecución material aúna todos los importes calculados hasta ahora en los presupuestos parciales, y se detalla en la **Tabla 31**.

Tabla 31. Presupuesto de ejecución material.

Concepto	Importe (€)
Presupuesto parcial: mano de obra	5.100
Presupuesto parcial: material	10.399,5
Presupuesto de inversión: equipos	125.361,63
Presupuesto de inversión: mano de obra	19.440
Total	160.301,13

4. PRESUPUESTO DE EJECUCIÓN POR CONTRATA

En la elaboración del presupuesto de ejecución por contrata se fija un porcentaje de gastos generales para elementos que no pueden cuantificarse ni predecirse con facilidad, como el agua o la electricidad. Éste se ha fijado en 13%. Además, se va a tener en cuenta un beneficio industrial del 4%. Estos porcentajes se encuentran calculados en la **Tabla 32**.

Tabla 32. Presupuesto de ejecución por contrata.

Concepto	Importe (€)
Presupuesto de ejecución material	160.301,13
Gastos generales (13%)	20.839,15
Beneficio industrial (4%)	6.412,05
Total	187.552,32

5. PRESUPUESTO BASE DE LICITACIÓN

Por último, una vez finalizado el presupuesto de ejecución por contrata, se añaden los impuestos, es decir, el IVA. Éste será del 21% y su valor se puede ver en la **Tabla 33**.

Tabla 33. Presupuesto base de licitación.

Concepto	Importe (€)
Presupuesto de ejecución por contrata	187.552,32
IVA (21%)	39.385,99
Total	226.938,31

El presupuesto final para el proyecto completo asciende a un valor total de **doscientos veintiséis mil novecientos treinta y ocho euros con treinta y un céntimos**.

