

Trabajo Fin de Grado

Grado en Ingeniería Química

Ingeniería básica de una planta de depuración de aguas residuales en la industria aeronáutica

Autor: Ana Pérez García

Tutor: Alicia Ronda Gálvez

Pedro Garcia Haro

Dpto. Ingeniería Química y Ambiental
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2019



Trabajo Fin de Grado
Grado en Ingeniería Química

Ingeniería básica de una planta de depuración de aguas residuales en la industria aeronáutica

Autor:
Ana Pérez García

Tutor:
Alicia Ronda Gálvez
Pedro García Haro

Dpto. de Ingeniería Química y Ambiental
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla
Sevilla, 2019

Trabajo Fin de Grado: Ingeniería básica de una planta de depuración de aguas residuales en la industria aeronáutica

Autor: Ana Pérez García

Tutor: Alicia Ronda Gálvez
Pedro García Haro

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2019

El Secretario del Tribunal

*A mis amigos, familia y maestros
que me apoyan y se alegran de mis
logros.*

Agradecimientos

Llegados a este punto, que pensé que nunca existiría, solo me queda agradecer a cada una de las personas que han estado conmigo desde el primer grupo de WhatsApp, formado por 100 personas, con ganas e ilusión de entrar en la Universidad, hasta los últimos compañeros; de todos ellos he aprendido. En especial a mis buitros, sin ellos la Etsi no hubiera sido lo mismo. A Irene por acompañarme desde el primer día hasta las cervecitas en los 100 montaditos de Barqueta. A mis Elenas por enseñarme que la vida tiene muchos puntos de vistas, que hay que reírse de lo malo y que juntas todo es mejor, más divertido. A Angela y Marta por llegar para quedarse, mis mayores apoyos en estos años y mis compañeras de vida. A mis trece+2, por saber que la amistad del colegio es para toda la vida.

A mis padres, porque sin ellos no hubiera sido posible nada de esto, por saber acompañarme en todo momento, por confiar en mí, por estar orgullosos y por toda la ayuda prestada: desde los tupperes mañaneros hasta las segundas matrículas. A mi tata y mis hermanos.

Tengo que agradecer a mis tutores; Alicia y Pedro, por toda la ayuda ofrecida y tiempo dedicado durante la elaboración de este proyecto, porque cuando más negro ví el camino supieron animarme para seguir hacia delante.

Ana Pérez García
Grado en Ingeniería Química
Sevilla, 2019

Resumen

Los tratamientos superficiales en la industria aeronáutica son procesos que, tras la fabricación de la pieza, se realizan para dotarlas de unas características determinadas a sus superficies; las protege contra la corrosión, elimina los puntos donde se inicia la fractura, y proporciona una mejora en el aspecto visible, entre otras muchas. Al ir realizando estos tratamientos, las piezas necesitan un enjuague de agua después cada baño, para así evitar el arrastre de los componentes de un baño a otro. Estas aguas se dividen según su composición en dos tipos: las aguas de carácter alcalino y de las de carácter ácidos.

El objetivo principal del proyecto es el diseño de una planta de tratamientos de aguas, para estas aguas proporcionadas de los diferentes baños; se plantea un proceso físico-químico en el que, de manera conjunta, se depuran ambas aguas. Esta depuración se centra en el contaminante principal, procedente de las aguas ácidas, el Cr (VI).

El presente proyecto consta de dos partes fundamentales: un primer estudio bibliográfico acerca de los diferentes tratamientos superficiales que se llevan a cabo en la industria aeronáutica, así como la problemática de sus aguas con las principales características de los contaminantes. Se proporciona un pequeño estudio económico-financiero sobre el agua generada anualmente y el gasto, en €/año, de las empresas referentes a la aeronáutica. Se tienen unos límites de vertido, según la Autorización de vertido del Decreto 109/2016; las aguas serán reutilizadas en el interior de la planta para próximos tratamientos de piezas.

La segunda parte del trabajo trata de una memoria técnica, en donde se diseñan los equipos presentes en la depuración, partiendo de una concentración de 40 gCr(VI)/L. También se hace referencia a la cantidad de floculante y coagulante que hay que añadir para que el Cr (VI) reducido precipite.

El diseño de la ingeniería básica de la planta cuenta con un sistema propuesto de control básico y de una búsqueda de localización, con la implantación y la ubicación de los equipos en la planta. Estas actividades son recogidas en un proceso de planificación que culmina con un Diagrama de Gantt.

Abstract

Surface treatments in the aeronautical industry are processes that after the manufacture of the piece are made to give certain characteristics to their surfaces; it protects them against corrosion, eliminates the points where the fracture begins, and provides an improvement in the visible aspect, among many others. When performing these treatments, the pieces need a water rinse after each bath, to avoid dragging the components from one bath to another. These waters are divided according to their composition into two types: alkaline water and acids.

The main objective of the project is the design of a water treatment plant for these waters provided by the different baths, for this a physical-chemical process is proposed in which both waters are purified together. This purification focuses on the main pollutant, coming from acid waters, Cr (VI).

The present project consists of two fundamental parts: a first bibliographical study about the different superficial treatments that are carried out in the aeronautical industry, as well as the problem of the waters in this sector with the main characteristics of the pollutants. A small economic-financial study is provided about the water generated annually and the cost, in € / year, of the companies referring to aeronautics. There are discharge limits, according to the Discharge Authorization of Decree 109/2016; The water will be reused inside the plant for next piece treatments.

The second part of the work deals with a technical project, in which each one of the dimensions of the equipment present in the purification is designed, starting from a concentration of 40 gCr (VI)/L . Reference is also made to the amount of flocculant and coagulant that must be added in order for the reduced Cr (VI) to precipitate.

The design of the basic engineering of the plant has a proposed system of basic control and a location search, with the implantation and location of the equipment in the plant. These activities are collected in a planning process that culminates with a Gantt Chart.

Índice

Agradecimientos	ix
Resumen	xi
Abstract	xiii
Índice	xv
Índice de Tablas	xvii
Índice de Figuras	xix
Índice de Anexos	xxi
Notación	xxiii
I. Contexto	
1 Contexto del proyecto	1
1.1 <i>Procesado químico de materiales en la industria aeronáutica</i>	1
1.2 <i>Problemática de las aguas en la industria aeronáutica</i>	2
1.2.1 Hidróxido de sodio	3
1.2.2 Cromo	4
1.3 <i>Tipos de tratamientos superficiales</i>	5
1.3.1 Pretratamiento	6
1.3.2 Tratamientos Superficiales	7
1.3.3 Postratamiento	9
1.3.4 Aguas de enjuague	10
1.4 <i>Marco legislativo</i>	10
2 Estudio económico-financiero	15
II. Memoria Técnica	
1. Justificación, Objetivos y Alcance	17
1.1 <i>Justificación</i>	17
1.2 <i>Objetivos y alcance</i>	17
2 Descripción del proceso	19
2.1 <i>Descripción de la planta</i>	19
2.2 <i>Descripción de los baños del proceso y aguas de enjuague</i>	20
2.2.1 Baño Desengrase Alcalino	20
2.2.2 Limpieza Alcalina	21
2.2.3 Prueba de Rotura de Agua	21
2.2.4 Decapado Alcalino	22
2.2.5 Prueba del factor ataque	22
2.2.6 Decapado ácido (Desoxidado)	23
2.2.7 Anodizado crómico	23
2.2.8 Sellado	24
2.2.9 Secado	25

2.2.10 Tabla resumen baños	25
2.3 Características de las aguas	26
2.4 Porcentaje retenido en las piezas	27
2.5 Seguridad frente a los tratamientos superficiales	28
3. Caracterización de las aguas a depurar	29
3.1 Aguas de enjuague alcalinos	29
3.2 Aguas de enjuague ácidos	30
3.3 Cuantificación de los contaminantes en los baños de lavado	31
3.4 Forma de operación	31
4. Diagrama de flujo del proceso	35
5. Diseño detallado de equipos	37
5.1 Cálculo de la dosificación agente reductor	37
5.2 Cálculo de la dosificación de hipoclorito	38
5.3 Clarificador	39
5.3.1 Adicción de Coagulantes	39
5.3.2 Adicción de Floculantes	40
5.3.3 Tiempo mínimo para la sedimentación de las partículas	40
5.3.4 Clarificador Secundario	43
5.4 Secador	44
5.7 Tabla resumen de resultados	46
6. Diseño del sistema de control básico	49
7. Implantación y distribución en la planta	51
7.1 Búsqueda de la localización	51
7.2 Implantación	52
8. Planificación de las tareas de ejecución	55
Referencias	59
III. Planos	
Anexo I. Tablas propiedades del agua	I
Anexo II. Balance de materia	III

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Principales riesgos del NaOH [6].	4
Tabla 2: Principales riesgos del Cr [7].	5
Tabla 3: Clasificación de los recubrimientos de las superficies [15].	8
Tabla 4: Capas de conversión. Características y aplicación [9].	9
Tabla 5: Calidad enjuague [11].	10
Tabla 6: Valores Límites de Emisión del Cr (VI) [4].	11
Tabla 7: Composiciones del baño de Desengrase Alcalino [11].	21
Tabla 8: Características más relevantes de los baños de la planta de tratamientos superficiales.	26
Tabla 9: Parámetros Agua Tipo A [27].	26
Tabla 10: Concentración en g/L de los contaminantes de los baños de agua tras tratamientos.	31
Tabla 11: Actividades del Diagrama de Pert para la forma que trabaja las cubas.	33
Tabla 12: Tabla resumen resultados equipos del diagrama de proceso	47
Tabla 13: Actividades y duración que se llevan a cabo en el proyecto.	55

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Esquema de un tratamiento superficial en la industria aeronáutica [2] y [3].	2
Figura 2: Esquema de una instalación de desengrase de vapor [12].	6
Figura 3: Comunidades autónomas que predominan en el sector de la aeronáutica en España.	15
Figura 4: Consumo de agua anual (m ³ /año) en tratamientos superficiales en la industria aeronáutica [2].	16
Figura 5: Diagrama de bloques de la planta de tratamientos superficiales [2] y [3].	19
Figura 6: Ciclo electrolítico del anodizado [3].	24
Figura 7: Técnica de Enjuague simple [2].	27
Figura 8: Piezas utilizadas en la planta.	28
Figura 9: Equilibrio de una solución de cloro, ácido hipocloroso e hipoclorito sódico a 25 °C [32].	29
Figura 10: Diagrama de Pourbaix del Cromo [33].	30
Figura 11: Diagrama de Pert de la gestión de las cubas.	32
Figura 12: Diagrama del proceso de depuración de las aguas residuales	17
Figura 13: Tanque de almacenamiento.	38
Figura 14: Fracción molar para un pH de 9,5.	38
Figura 15: Coeficientes de rozamientos para esferas, discos y cilindros [6].	42
Figura 16: Modelo de temperaturas en un secador adiabático continuo en contracorriente [35].	45
Figura 17: Diagrama de instrumentación de la planta depuradora de las aguas	50
Figura 18: Localización de la calle Torre de los Herberos con respecto a las vías de acceso desde Sevilla y Dos Hermanas.	51
Figura 19: Emplazamiento del terreno en calle Torre de los Hebreros, número 3.	52
Figura 20: Diagrama de Gantt del proceso. Fuente: Propia.	56

ÍNDICE DE ANEXOS

Tabla X1: Propiedades del agua saturada (líquido-vapor): Tabla de presiones [42].	I
Tabla X2: Calores específicos de diversos líquidos y sólidos [42].	II
Tabla X3: Calores específicos para gas ideal en el aire, nitrógeno y oxígeno [42].	III
Tabla Y1: Balance de materia de la planta depuradora de agua de la corriente 1 hasta la 12.	IV
Tabla Y2: Balance de materia de la planta depuradora de agua de la corriente 13 hasta la 24.	V

Notación

A_{\min}	Área mínima (m^2)
A_p	Área transversal de la partícula (m^2)
C_D	Coefficiente de rozamiento (-)
C_{in}	Concentración de sólidos a la entrada (g/L)
C_{pH_2O}	Calor específico del agua (kJ/kgK)
$C_{p_{aire}}$	Calor específico del aire (kJ/kgK)
C_u	Concentración de fangos a la salida (g/L)
D_C	Diámetro del clarificador (m)
D_p	Diámetro de las partículas (m)
g	Aceleración de la gravedad (m/s^2)
G_{\min}	Flujo mínimo descendente (g/m^2h)
H	Altura del clarificador (m)
m_p	Masa de la partícula (kg)
$n_{\text{Hipoclorito}}$	Moles de hipoclorito (mol/L)
n_{H_2O}	Moles de agua (mol/L)
n_{NaOH}	Moles de NaOH (mol/L)
Q_o	Caudal de líquido de entrada (l/h)
Re_p	Número de Reynold para las partículas (-)
T_{inH_2O}	Temperatura de entrada del fluido líquido ($^{\circ}C$)
T_{inair}	Temperatura de entrada del aire ($^{\circ}C$)
T_{outair}	Temperatura de salida del aire ($^{\circ}C$)
t_R	Tiempo mínimo de sedimentación (s)
T_{vap}	Temperatura de vaporización del agua ($^{\circ}C$)
u_o	Velocidad del fluido (m/s)
u_t	Velocidad terminal del fluido (m/s)
Letras griegas	
λ	Calor de vaporización del agua (kJ/kg)
ρ	Densidad del fluido (kg/m^3)
ρ_p	Densidad de la partícula (kg/m^3)
\dot{m}_{H_2O}	Caudal másico del agua (kg/h)
\dot{m}_{aire}	Caudal másico de aire (kg/h)
μ	Viscosidad del fluido ($kg/m\cdot s$)

I. CONTEXTO

1 CONTEXTO DEL PROYECTO

El presente proyecto se centra en la depuración de las aguas residuales procedentes de los tratamientos superficiales de una industria aeronáutica, ya que estas suponen una importante corriente residual en este tipo de industrias.

Para combatir el problema de la contaminación de las aguas en las industrias el Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación y Ministerio para la Transición Ecológica comienza a llevar a cabo en abril de 2018 una Estrategia Española de Economía Circular con el objetivo de conseguir una sociedad eficiente en el uso de recursos, es decir, que se intente utilizar en la mayor medida posible residuos como recursos [1]. El Plan de Acción 2018-2020 consta de 70 líneas de actuación y 101 fichas, con un presupuesto de 837 millones de euros, de los cuales 478,2 millones son destinados para la reutilización de las aguas. Esta estrategia está impuesta para una serie de sectores prioritarios: el sector de la construcción, sector de la agroalimentación, sector industrial, de bienes de consumo y servicios y del turismo [1]. Por lo tanto, el sistema de tratamiento de aguas residuales procedente de la industria aeronáutica propuesto que permite reutilizar las corrientes residuales de salida encaja dentro de las líneas de actuación del Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación y Ministerio para la Transición Ecológica.

En este capítulo se explica de forma general los diferentes tratamientos superficiales que se tratan en este tipo de industria y de forma más específica el tratamiento del cual se va a profundizar, además se lleva a cabo una introducción a la problemática que existe sobre las aguas residuales industriales, centrándose en la industria aeronáutica o de tratamientos de materiales. Todo ello con el objetivo de proponer un proceso de depuración de aguas residuales de una planta aeronáutica, quedando así descrito los objetivos y alcance de este.

1.1 Procesado químico de materiales en la industria aeronáutica

El proceso de tratamiento de las piezas procedentes de la industria aeronáutica, se muestra en la Figura 1, comienza con una limpieza manual, tras ella los materiales transcurren por siete procesos diferentes, de los cuales tres de éstos proporcionan aguas residuales de carácter alcalino, debido al posterior enjuague en cada proceso, estas aguas tienen alto contenido en NaOH y cianuros; mientras que los tres restantes originan aguas residuales de carácter ácido, donde el Cr(VI) es su principal contaminante. El secado no necesita ningún enjuague posterior. Estas aguas de residuo alcalinas y ácidas no cumplen con la normativa para poder ser vertidas. Dicho proceso se explica más detenidamente a lo largo del proyecto.

Se observa claramente una gran cantidad de corrientes de aguas residuales, las cuales pueden ser tratadas para ser reutilizadas en la propia planta.

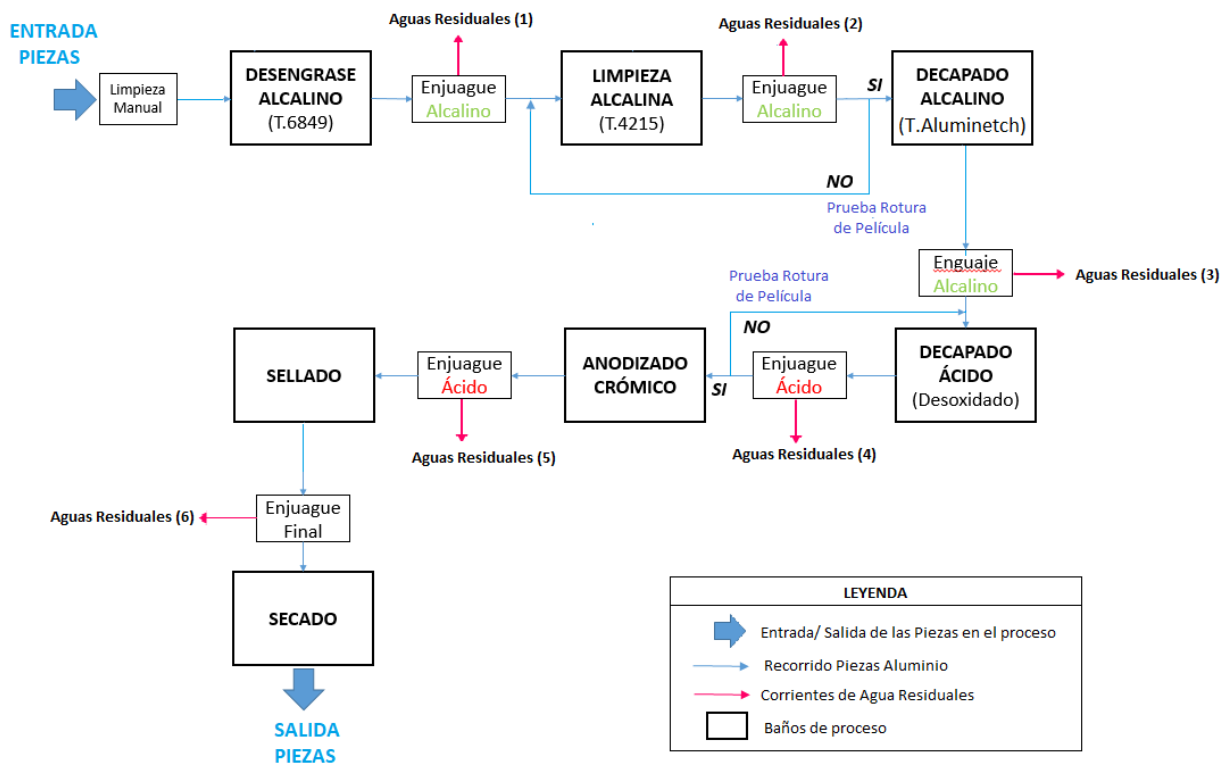


Figura 1: Esquema de un tratamiento superficial en la industria aeronáutica [2] y [3].

1.2 Problemática de las aguas en la industria aeronáutica

Cuando se habla de aguas residuales industriales se refieren a todas aquellas aguas que se originan en instalaciones industriales por sus procesos de fabricación, producción, transformación, consumo, limpieza o mantenimiento [4].

Estas aguas deben de ser tratadas antes de ser vertidas, bien sea al medio natural o a la red de saneamiento, o reutilizarlas en la planta. Como se ha mostrado en el esquema de la Figura 1, existen unas corrientes de aguas residuales en la industria aeronáutica que no se pueden verter directamente, y que tienen que ser tratadas antes de ser vertidas, en este proyecto se reutiliza el agua ya tratada para el enjuague de las piezas tras los tratamientos.

Entre los contaminantes de las aguas industriales en los procesos de tratamiento superficiales en la industria aeronáutica para piezas de aleaciones de aluminio se encuentran NaOH, procedente de los baños alcalinos, y Cr(VI), existente en los baños ácidos.

En el Registro Estatal de Emisiones y Fuentes Contaminantes (PRTR), según el Ministerio para la Transición Ecológica del Gobierno de España se recogen unas cifras de cromo y compuestos en el año 2017, en emisiones por atmósfera de 0,302 t/año, emisiones directas al agua 0,365 t/año y emisiones indirectas al agua 0,652 t/año [5].

Los valores límites de emisiones de Cr(VI) a las aguas superficiales según el Decreto 109/2015, de 17 de marzo, donde se aprueba el Reglamento de Vertidos al Dominio Público Hidráulico y al Dominio Público Marítimo-Terrestre de Andalucía son de 0,01 mg/L valor mensual [6]. Por tanto, las corrientes de salida después del sistema de tratamiento propuesto deberán estar por debajo de este valor.

1.2.1 Hidróxido de sodio

El NaOH, también llamado sosa, es un sólido blanco cristalino sin olor que absorbe la humedad del aire, a temperatura ambiente. Es una sustancia elaborada a partir de materias primas, manufacturada.

Cuando se disuelve en agua o se neutraliza con un ácido libera una gran cantidad de calor suficiente como para encender materiales combustibles. Es muy corrosivo [7]. Es utilizado en la industria principalmente en los detergentes, por ello en la planta se encuentra en los baños formado por agua desmineralizada con un tanto por ciento añadido de producto para la limpieza de las piezas. Se utiliza en los baños alcalinos para eliminar aceites, grasas, ceras y diversos tipos de partículas.

El compuesto a la hora del tratamiento de depurar de las aguas se utiliza para controlar el pH, concretamente para subir el pH de las aguas ácidas, ya que al entrar en contacto con el agua se separa en catión de sodio y anión hidróxido y se disminuye la acidez de ésta.

Un alto contenido de NaOH en las aguas de vertido puede ser un contaminante porque presenta diferentes riesgos tanto para el hombre como para el medio ambiente. En la Tabla 1 se muestran los principales riesgos. No se debe verter NaOH al medio ambiente porque puede afectar a las personas y animales y se puede producir una rápida propagación, en contacto con ríos, alcantarillas, etc.

Tabla 1: Principales riesgos del NaOH [8].

PRINCIPALES RIESGOS DEL NaOH	
<i>Ingestión</i>	Sangre en las heces
	Quemaduras en el esófago y el estómago
	Diarrea y vómitos
	Dolor abdominal fuerte
<i>Inhalación</i>	Dificultad respiratoria
	Inflamación del pulmón
<i>Inoculación</i>	Inflamación de la garganta
	Urticaria
	Irritación
<i>Abrasión</i>	Daños en la córnea
	Ceguera
<i>Medio ambiente</i>	Aumenta la conductividad eléctrica del agua

1.2.2 Cromo

El Cr es un elemento químico, se trata de un ácido fuerte, metal de color blanco plateado, duro y quebradizo. Es muy resistente a la corrosión. Sus dos estados de oxidación más comunes son +6 el más alto y el +3, el más estable. Se utiliza en la metalurgia para aportar resistencia a la corrosión y un acabado brillante [9].

Cuando el cromo se encuentra con valencia menor no se considera especialmente un riesgo para la salud, se trata de un elemento esencial para el ser humano, sin embargo, los compuestos de Cr(VI) se consideran tóxicos y cancerígenos si son ingeridos. La Organización Mundial de la Salud (O.M.S) en el año 1958 recomendó una concentración máxima de 0,05 mgCr(VI)/L en el agua de consumo [10]. En este proyecto el agua para vertido o reutilización en la planta no puede superar más del 0,01 mgCr(VI)/L [6].

En la Tabla 2, se proporcionan los principales riesgos que pueden causar el Cr(VI) sobre la salud, tanto si se encuentran en productos en contacto con la piel como si es respirado. Los cultivos contienen sistemas para gestionar la toma de cromo para que esta sea suficientemente baja para no causar cáncer. Las plantas solo absorben Cr(III).

Tabla 2: Principales riesgos del Cr [9].

PRINCIPALES RIESGOS DEL Cr
Irritación y sangrado de nariz
Úlceras en el estómago
Debilitamiento de sistema inmune
Daños en los riñones e hígado
Alteraciones del material genético
Cáncer de pulmón
Muerte
Puedes dañar a cultivos

Los principales usos en la industria son para la producción de aleaciones anticorrosivas de gran dureza y resistentes al calor y como recubrimiento para galvanizado [9].

1.3 Tipos de tratamientos superficiales

Son unos procesos que se realizan para dar características determinadas a la superficie de un material, sin alterar la geometría de las piezas. Los objetivos de estos tratamientos:

- Aumentar la resistencia de un componente frente a factores externos, como la erosión por el impacto con partículas o el ataque químico, relacionado en su aplicación y así aumentar la vida de éste. Ciertos recubrimientos se comportan como aislantes térmicos pudiendo soportar el material altas temperaturas.
- Debido a que muchos de los recubrimientos tienen colores atractivos, estos tratamientos se utilizan para cambiar el aspecto de un componente.
- Modificar las propiedades ópticas de un componente ya que alguno de los recubrimientos son empleados como filtros contra radiaciones indeseada.
- Impedir o retratar el paso de especies entre un recubrimiento y sustrato.
- Preparar al material para un tratamiento posterior [11].

Para conseguir un acabado superficial se podría decir que se divide en tres procesos: Operaciones previas para acondicionar la pieza a recubrir, el recubrimiento y finalmente un post-tratamiento que aporta unas características de protección específica a la pieza recubierta.

1.3.1 Pretratamiento

Antes de proceder al recubrimiento superficial de la pieza, se necesita un tratamiento previo de preparación de la superficie para eliminar los restos de grasas e impurezas superficiales que contiene. Por ello la primera operación previa debe consistir en un pulido mecánico, es decir conseguir un alisado y eliminación de ásperas para tener una superficie uniforme.

El pulido mecánico suele hacerse mediante granallado, o chorreado de arena a presión sobre el espacio. Este chorreado abrasivo puede ser seco o húmedo.

Seguidamente en este apartado se dividen en dos los pretratamientos a seguir: El desengrasado químico y el decapado o desoxidado [11].

1.3.1.1 Desengrasado

La finalidad de este pretratamiento es no contaminar los baños posteriores eliminando los restos de grasas y aceites de protección, marcas de tintas y sellos de identificación. Esta operación se puede llevar a cabo de diferentes formas:

- En fase vapor.
- Por inmersión en baño químico.

El desengrasado en fase vapor consiste en la condensación de un flujo de vapor, normalmente vapores calientes de solventes de cloruro o de fluoruro, sobre la superficie de las piezas a desengrasar arrastrando la suciedad aceitosa. La instalación se puede ver en la Figura 2, la cual no entra en el alcance de este proyecto.

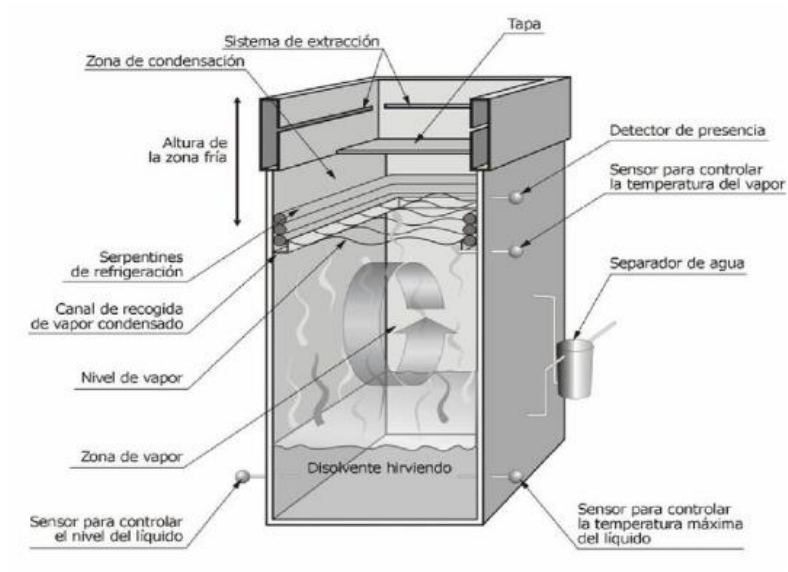


Figura 2: Esquema de una instalación de desengrase de vapor [12].

Por otro lado, el desengrase por inmersión en un baño bien contenga disolvente o detergente, se lleva a cabo de la misma manera. Se introduce la superficie de la pieza a tratar en la solución química durante un tiempo prefijado [13]. Existen sistemas de inmersión variados, desde la inmersión manual hasta instalaciones totalmente automatizadas [14]. La selección de los productos químicos y del proceso de desengrase a utilizar depende de los siguientes factores [15]:

- Las características de las impurezas a limpiar
- La naturaleza de la pieza. (Compatibilidad de los productos de desengrase con los materiales de la pieza).
- El grado de limpieza requerido.
- El coste económico.
- El impacto sobre el medio ambiente.

El aumento de temperatura favorece el desengrase.

1.3.1.2 Decapado o dexosidado

Es el proceso encargado de eliminar las impurezas o acabados superficiales, como machas, oxidados u otras impurezas. El decapado consiste en aplicar químicos, ácidos, para eliminar la capa de óxido aplicada en procesos anteriores y reestablecer su estado original. Se usan agentes químicos como el ácido sulfúrico, ácido clorhídrico o el ácido fosfórico.

Para contrarrestar la actuación del ácido sobre el óxido es importante usar productos inhibidores. El proceso se desarrolla introduciendo la pieza en ese baño ácido un tiempo estipulado y este se encarga de disolver la primera capa superficial.

Es importante realizar un lavado adecuando una vez finalizada esta etapa ya que pueden producir corrosión las sales de hierro adheridas tras sacar el metal de los ácidos [16].

1.3.2 Tratamientos Superficiales

Las piezas metálicas suelen estar recubiertas, con pintura, chapeado u otros procesos. Esto se debe a unas principales razones [11]:

- Mejorar el aspecto del producto. (Ej: Dar color o textura)
- Protegerlas contra la corrosión del sustrato.
- Reducir la fricción de la superficie y aumentar la resistencia al desgaste.
- Mejorar la conductividad eléctrica.
- Aumentar la resistencia eléctrica.
- Preparar la superficie para un procesamiento posterior.
- Reconstruir las superficies erosionadas durante el proceso.

En la Tabla 3, se muestra la clasificación por grupos, de los tratamientos superficiales según el tipo de recubrimiento.

Tabla 3: Clasificación de los recubrimientos de las superficies [17].

GRUPOS	RECUBRIMIENTOS
<i>Orgánicos</i>	Pinturas, resina lacas, grasas, revestimiento de plástico o aislante.
<i>Metálicos</i>	Cincado, Niquelado, Cobreado
<i>Por conversión</i>	Fosfatado, Cromatado, Anodizado
<i>Especiales</i>	Vitrificados, cementos, termoplasticos

Los **recubrimientos orgánicos** son resinas y polímeros producidos de forma natural o sintética, generalmente son líquidos que se secan o endurecen formando una película superficial [18].

Entre los **recubrimientos metálicos**, con el fin de proteger a otros metales de la corrosión se encuentran los metales más usados en la industria: (Cu, Ni y Cr). El cobre aumenta la conductividad y evita la corrosión por rozamiento; no se usa para fines decorativos. El níquel sirve como resistencia a la oxidación y es resistente a la temperatura; se emplea para revestimiento de instalaciones de productos químicos

Por último, el cromo proporciona resistencia frente a la corrosión, incrementa su dureza superficial y facilita la limpieza del objeto; se puede usar con fines decorativos [19].

El **recubrimiento por capa de conversión** consiste en la transformación de la superficie del metal base a recubrir, se forma una capa protectora en ésta que presenta funciones protectoras que varían en función de la capa de conversión conseguida.

Entre este tipo de recubrimiento se encuentran el fosfatado, cromatado y anodizado. El fosfatado es un tratamiento químico en el que una solución de fosfatos de ácidos de zinc, hierro o manganeso entra en contacto con piezas de hierro, acero preferiblemente [20].

Cuando ocurre un ataque químico contra un metal cuando se pone en contacto con una solución acuosa de ácido crómico o sales de cromo, se le conoce con el nombre de cromados, basado en la electrólisis, depositándose una fina capa de cromo metálico sobre la pieza [21].

Como tercer tipo de recubrimiento por capa de conversión se tiene el anodizado, el cual se basa en una envoltura de óxido estable mediante una reacción electroquímica. Tienen lugar las siguientes reacciones:

- En el ánodo se origina una película, continua y porosa, principalmente de óxido de aluminio ya que se desprende oxígeno y se disuelve el metal.
- En el cátodo se reducen especies oxidadas y se desprende hidrógeno [11].

En la siguiente Tabla 4, se resumen las características y las aplicaciones de los diferentes tipos de recubrimientos por capa de conversión y así poder sus diferencias.

Tabla 4: Capas de conversión. Características y aplicación [11].

CAPA DE CONVERSIÓN	CARACTERÍSTICAS	APLICACIÓN
<i>Fosfatado</i>	Absorbente Resistente al desgaste por fricción.	Hierro y acero. Prepara la superficie para el pintado. Engranajes, levas, pistones
<i>Cromatado</i>	Resistencia corrosión atmosférica	Tratamiento final de recubrimiento de cinc y cadmio
<i>Anodizado</i>	Capa de óxido en la superficie del metal Película gruesa anticorrosiva	Superficies de Aluminio

Para finalizar los tratamientos superficiales se tienen los recubrimientos que cumplen finalidades específicas, protegiendo piezas que deben permanecer muchos años en funcionamiento contra agentes de alta agresividad, reciben el nombre de **recubrimientos especiales**. Se puede distinguir entre los vitrificadores, formados por una capa de vidrio fundido y solidificado sobre la base. Los vitrificadores se caracterizan por ser duros, tener una alta resistencia química y ser compactos y adherentes. Se usan sustancias bituminosas, como puede ser el alquitrán, para la protección de materiales contra microorganismos.

Los termoplásticos también presentan unas buenas condiciones de aislantes de calor, característicos por deformarse por la acción del calor y volver a su estado sólido inicial al bajar la temperatura. En este grupo también entran los recubrimientos temporales, imprescindible a la hora de proteger la pieza durante su almacenamiento o transporte.

1.3.3 Postratamiento

Una vez finalizado el tratamiento adaptado a la superficie de la pieza, se encuentran otros métodos para realizar un acabado final.

Destaca el proceso de pasivación que se trata de renovar la capa pasiva, capa que protege al metal de la corrosión, mediante productos químicos. Se forma una película inerte sobre la base del material dejándolo cubierta contra la acción de agentes externos.

“Pasivo” se define como menos afectado por factores ambientales. La pasivación no cambia la apariencia externa de la superficie del metal [22].

1.3.4 Aguas de enjuague

Las necesidades de enjuague están relacionadas con el nivel de arrastre que producen la piezas al pasar de una cuba a otra. Esto se realiza para evitar que otros baños queden contaminados de los baños anteriores y para que la acción prolongada de electrolitos sobre la superficie de las piezas no suponga un deterioro de la pieza [13].

Las alternativas de enjuague tienen como objetivos: controlar el arrastre de los baños de procesos a los baños de enjuagues y minimizar el consumo de agua [13].

En la siguiente Tabla 5 se recogen los valores de calidad que se obtienen cuando las piezas pasan por el baño de enjuague para los diferentes grupos de subprocesos; donde C_o es la concentración del baño de proceso y C_r la concentración final máxima aceptable en el enjuague.

Tabla 5: Calidad enjuague [13].

Tipos de Procesos	Contaminante	Valor C_o (g/L)	Valor C_r (mg/L)
<i>Preparación de superficies (desengrase, decapado, activado)</i>	Fe^{3+}	30 g/L	60-6 mg/L
<i>Acabados multicapa (Cu, Ni, Cr..)</i>	Ni^{2+}	10g/L	2-1 mg/L
	Zn^{2+}	5 g/L	1-0,5 mg/L
<i>Pasivación crómica</i>	Cr^{6+}	5 g/L	5-2,5 mg/L
<i>Fosfatación, Anodizado, Pavonado</i>	SO_4^{2-}	200 g/L	100-40 mg/L
<i>Enjuagues finales críticos</i>	Conductividad < 5 μ S/cm		

1.4 Marco legislativo

Existen varias normativas acerca de los vertidos de aguas residuales, la planta de procesos superficiales se encuentra en Andalucía, por lo tanto, este proyecto se basa en los límites de vertido proporcionados por el Decreto 109/2015 que la Consejería del medio ambiente y ordenación del territorio llevó a cabo el 17 de marzo, por el que se aprueba el Reglamento de Vertido al Dominio Público Hidráulico y al Dominio Público Marítimo-Terrestre de Andalucía. En el caso del presente proyecto, se intenta reutilizar las aguas de nuevo en la planta, para posteriores enjuagues. Como Dominio Público Hidráulico se considera las aguas continentales, ríos, lagos, embalses entre otros.

En el capítulo II, “Autorización de vertido”, en la sección sexta, de este Decreto 109/2015, “Límites de emisión y objetivos y normas de calidad ambiental”, Artículo 24 muestra los límites de emisión. El punto 6 de este artículo expresa: “*Los límites de emisión se refieren a concentraciones máximas, sin que pueda superarse el valor señalado en la autorización*” [6].

Para fijar estos límites y parámetros se tiene en cuenta el estado de la técnica, las características del proceso, materias primas y la capacidad de absorción de la carga contaminante [6].

Los límites establecidos para el vertido de las aguas se ven reflejado en las tablas del Anexo IV, “Valores Límites de Emisión” de este Reglamento. El valor recogido del parámetro que interesa para este proyecto, Cr(VI), viene determinado según el tipo de agua en la Tabla 6.

Tabla 6: Valores Límites de Emisión del Cr(VI) [6].

Parámetro	Uds	Aguas costeras y de transición			Aguas superficiales		
		Valor mensual	Valor diario	Valor puntual	Valor mensual	Valor diario	Valor puntual
Cr(VI)	mg/L	0,03	0,033	0,036	0,01	0,011	0,012

El punto 4, del Artículo 24 del mismo Reglamento especifica que “*Podrán sobrepasarse los límites establecidos del Anexo IV en aquellos casos especiales en los que se apliquen las mejores técnicas disponibles (MTD) y siempre que pueda justificarse que la emisión de dichos vertidos no afecta al logro de los objetivos medioambientales de la masa de agua afectada*” [6].

El presente proyecto se basa en un proceso físico-químico, donde, con la ayuda de adición de sustancias coagulantes y floculantes, el principal contaminante, Cr(VI), precipita y tras un secado se obtiene un lodo que se trata fuera de la planta. El agua en cierta medida se intenta reutilizar dentro de la planta para posteriores tratamientos de las piezas de aluminio. El agua residual a la salida del baño de enjuague sobrepasa los valores máximo que se indican en el Anexo IV del Decreto 109/2015, unos 40 gCr(VI)

/L, por lo que es necesario plantear un sistema de depuración para reducirlo hasta que se alcance 0,01 mgCr(VI)/L y se pueda verter en caso de que fuera necesario en las aguas superficiales.

2 ESTUDIO ECONÓMICO-FINANCIERO

Según el periódico El País, en una publicación del 28 de agosto del 2016, “España es uno de los diez países del mundo capaz de poner en vuelo un avión”; en España existen 351 empresas dedicadas al sector de la aeronáutica, dato referente en el año 2016, de las que el 96% son pymes, empresa pequeña o mediana en cuanto a volumen de ingresos [23]. Las comunidades autónomas que predominan en este sector se tratan de Madrid, País Vaco y Andalucía. En la Figura 3, se representan los lugares donde predominan el sector de la aeronáutica en España.



Figura 3: Comunidades autónomas que predominan en el sector de la aeronáutica en España.

Dicho sector tiene un gran consumo de agua, tanto durante el proceso de fabricación de las distintas piezas que componen el avión como durante el tratamiento superficial de dichas piezas. La Figura 4, muestra el consumo de agua anual ($\text{m}^3/\text{año}$) que consumen las empresas en España. Ya que en el TFG se ha visto que las cubas necesarias son menores de 30 m^3 , el consumo de agua del sector aeronáutico estaría dentro de las empresas sombreadas en oscuro (Figura 4). Además, se podría determinar que por media las empresas de menos de 30 m^3 generan alrededor de $15.000 \text{ m}^3/\text{año}$.

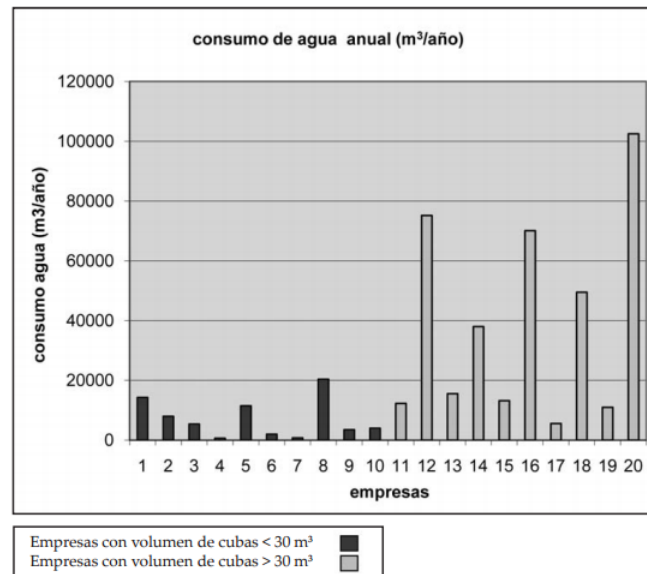


Figura 4: Consumo de agua anual (m³/año) en tratamientos superficiales en la industria aeronáutica [2].

En los tratamientos superficiales, el agua que se consume es similar al agua que se genera, ya que el agua que se consume en mayor medida es el agua de enjuague de las piezas; este agua actualmente es vertida al medio. Dado que estas aguas tienen valores de contaminantes por encima de los permitidos por la ley, el Artículo 289, del Capítulo II, “Canon de control de vertido” del Real Decreto 606/2003 del 23 de mayo, por el que se aprueba el Reglamento del Dominio Público Hidráulico, muestra que *“Los vertidos al dominio público estarán gravados con una tasa destinada al estudio, control, protección y mejora del medio receptor, se denomina canon de control de vertidos”*. El Artículo 291, del mismo Real Decreto, especifica cuál es el importe de este canon de control, donde se calcula el volumen del vertido por un precio unitario de control de vertido. Este precio unitario se trata de 0,03005 €/m³ para aguas residuales procedentes de industrias [24]. Es decir, se estima que el gasto de la planta en aguas residuales es de unos 451 €/año.

El sistema de tratamiento propuesto permite tanto el ahorro en el consumo de agua al reutilizar un agua residual como el ahorro económico de no tener que pagar el canon de vertido.

El sector aeronáutico se encuentra en continuo movimiento, se valora que el crecimiento en los próximos veinte años sea de un 5% [25]. Por ello, se tiene en cuenta en el proyecto una posible ampliación, si fuera necesaria, en caso de ampliar la zona de producción y el sistema propuesto está diseñado para que la depuración sea más exigente debido a que bajen los límites de emisión en la normativa.

II.MEMORIA TÉCNICA

1. JUSTIFICACIÓN, OBJETIVOS Y ALCANCE

En esta segunda parte del proyecto se hace un estudio más técnico del proceso de depuración de las aguas, comenzando con una descripción de la planta, el diseño de los equipos que intervienen, la duración del proyecto y un breve presupuesto. Este primer capítulo está compuesto de una breve justificación y el objetivo y alcance del trabajo.

1.1 Justificación

El presente proyecto propone un proceso de depuración de aguas residuales de una planta aeronáutica, procedentes de los tratamientos superficiales de esa industria. Dicho proyecto se enmarca dentro del Plan de Acción 2018-2020 propuesto por el Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación y Ministerio para la Transición Ecológica, dentro de las líneas de actuación destinadas a la reutilización de las aguas. Por lo tanto, se propone un proceso de tratamiento de las aguas residuales que permita reutilizar las corrientes residuales de salida encaja de la planta propuesta.

1.2 Objetivos y alcance

El principal objetivo del proyecto es realizar una ingeniería básica sobre la depuración de las aguas de enjuague de una planta de tratamiento superficiales en una industria aeronáutica. Para ello se parte de un estudio bibliográfico de los distintos procesos que se realizan en la industria y los principales residuos que se generan para poder conocer y caracterizar las principales corrientes a depurar de proceso. Estas aguas de lavado se dividen en aguas alcalinas donde su principal contaminantes en el NaOH y aguas ácidas donde se encuentra en gran cantidad el Cr(VI).

Se quiere conseguir mayoritariamente la reducción del Cr(VI) difundido en las aguas de enjuague posterior al baño de desoxidado, donde se produce el anodizado del aluminio, material escogido para las piezas que se tratan en la planta. Para conseguir esta obtención de electrones por parte del Cr se le añade bisulfito de sodio como agente reductor. Esta agua ácida aumenta su pH con la adicción de NaOH procedente de los residuos obtenidos en las aguas de lavado de los baños alcalinos. Ambos fluidos llegan a neutralizarse, gracias a la adicción de cal, y se mezclan con un pH aproximadamente de 9,5, precipitan, debido a la adicción de cloruro férrico como coagulante y polielectrolito líquido como floculante, y decantan en un clarificador secundario, obteniéndose dos corrientes, un agua ya clarificada, la cuál tiene que cumplir con los límites establecidos según el Decreto 109/2015 de 0,01 mg Cr(VI)/L mensual en el agua de vertido o agua reutilizada en la planta, y la otra corriente se trata del residuo, del lodo generado por el Cr(VI) eliminado; este lodo se encuentra con un 60% de agua por

lo que hay que introducirlo en un secador antes de ser enviado a tratamiento fuera de la planta. Este proyecto no se centra en la gestión de los residuos peligrosos que se producen en la depuradora. El agua obtenida de este secador será recirculada al tanque de mezcla, para comenzar de nuevo con el tratamiento.

Para apoyar esta idea, el trabajo consta de un diagrama de flujo del proceso, en el que se encuentra cada uno de los equipos que posteriormente serán diseñados. Se plantea un control básico de dicha planta, con cada uno de los lazos encargados de modificar cada una de las variables cuando exista una perturbación.

Y por último, se busca una localización para dicha planta, encontrándose el terreno en el municipio de Dos Hermanas, Sevilla y se propone una implantación y ubicación de los diferentes equipos en la planta.

2 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO

En este capítulo se va a describir el proceso de los tratamientos superficiales de las piezas en el sector de la aeronáutica, basándose en cada una de las características de los diferentes baños.

2.1 Descripción de la planta

La planta de estudio consiste en una planta de tratamiento superficial de piezas de aluminio de la industria aeronáutica, en la que se realiza el tratamiento a diferentes piezas para poder conseguir un perfecto acabado sin grasas ni aceites y poder asegurar una correcta adhesión de la pintura y piezas resistentes a la corrosión debido a la capa anódica.

Estos tratamientos constan de cinco baños de procesos químicos, un baño de sellado, un secado y seis baños de agua de enjuague; las cuáles se presenta una técnica de depuración en el estudio. En la Figura 5 se muestra el diagrama de bloque de dichos tratamientos, el cuál se explicará con mayor detenimiento en este punto.

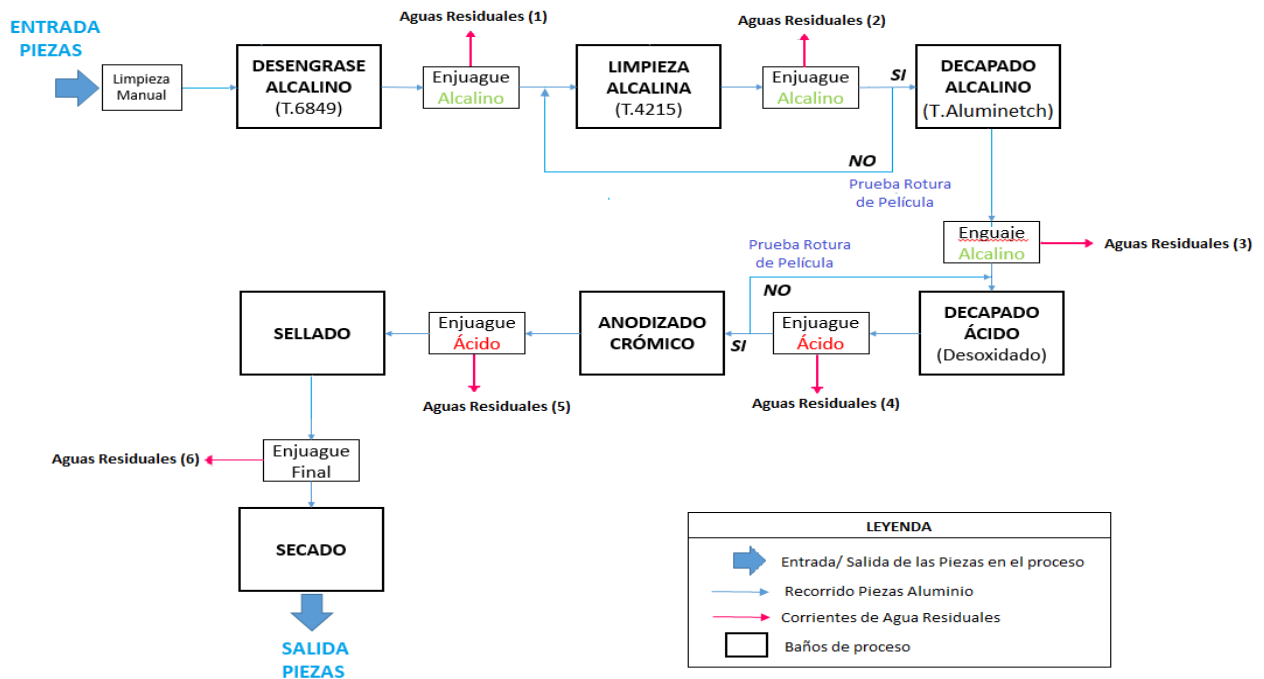


Figura 5: Diagrama de bloques de la planta de tratamientos superficial [2] y [3].

El recorrido que realizan las distintas piezas por el interior de la planta para ejecutar los tratamientos es el siguiente:

- 1) Se realiza una limpieza manual previa.
- 2) Transcurren al primer baño de desengrase alcalino donde se efectúa la primera limpieza para eliminar gran parte de la suciedad de la superficie.
- 3) Pasan a un baño de enjuague
- 4) Se sumergen en un nuevo baño de limpieza formado por una disolución alcalina.
- 5) Pasan a un baño de enjuague
- 6) Se realiza el ensayo de rotura de película, para asegurar que los tratamientos anteriores son correctos.
- 7) En caso afirmativo, las piezas llegan al baño de decapado alcalino para poder hacer frente a las grietas de la parte exterior de las piezas. En caso negativo, se repite la limpieza alcalina.
- 8) Pasan a un baño de enjuague
- 9) Las piezas son destinadas a un baño de desoxidado o decapado alcalino, para devolver las composiciones de inicio, puesto que el anterior baño las deja de un color ennegrecido. El tiempo de inmersión de las piezas viene determinado de la prueba del factor de ataque, los μm por hora que puede llegar a eliminar estas soluciones.
- 10) De nuevo, se realiza la prueba de rotura de película.
- 11) En caso afirmativo, comienza el recubrimiento ante la corrosión en el baño de anodizado cromo. En caso contrario, se repite el proceso de desoxidado.
- 12) Pasan a un baño de enjuague.
- 13) Transcurren hacia un baño de sellado, para cerrar los poros existentes en las superficies de aluminio. Este baño se encuentra a altas temperaturas.
- 14) Pasan a un baño de enjuague.
- 15) Las piezas culminan el proceso en un baño de secado.

Cada vez que las piezas pasan a un baño de enjuague se tiene un efluente de aguas residuales que posteriormente son tratadas en la planta de tratamientos de aguas. Se componen de tres corrientes de aguas de enjuague alcalino y tres corrientes de agua de enjuague ácidas.

2.2 Descripción de los baños del proceso y aguas de enjuague

A continuación, se explica las diferentes composiciones y características de los baños de procesos y de sus respectivas aguas de enjuague.

2.2.1 Baño Desengrase Alcalino

En esta solución alcalina se elimina los restos de grasas, aceites y tipos de ceras que pueda llegar a tener la pieza que no han podido ser desechadas en la limpieza previa manual.

Este baño está compuesto mayoritariamente por un desengrasante alcalino acuoso transparente llamado Turco 6849 cuyos límites de adición están entre 10-20%. Se intenta trabajar en el límite nominal 15%.

La temperatura de estos baños oscila entre los 61-70 °C. El tiempo de inmersión de las piezas entre 5-10 min. El pH alcalino se encuentra entre 12-14. El agua utilizada en este tipo de baños es de tipo A. La agitación de este baño será por medio de soplantes.

En la Tabla 7, se refleja otros de los componentes de este baño.

Tabla 7: Composiciones del baño de Desengrase Alcalino [13].

COMPUESTOS	CANTIDAD (g/L)
NaOH	40
Na₂CO₃	25
Na₃PO₄	10
Humectantes	2-5

Este baño de acero inoxidable tiene un volumen de 13.500 L. Sus dimensiones son de 6,45 metros de longitud, 0,89 metros de ancho y 2,35 metros de profundidad, teniendo una inclinación en las paredes del 0,5%.

2.2.2 Limpieza Alcalina

Este segundo baño se trata de una solución desengrasante que no ataca al metal compuesto por agua desmineralizada tipo A y una disolución alcalina formada por un producto comercial “Turco 4215 NCLT” [26].

La composición de dicho producto es la siguiente [27]:

- Sal de Boro (Borax): 30-40 %
- Triofosfato de pentasodio: 20-30%
- Nitrato de sodio (NaNO₃): 5-10%

Esta solución se encuentra en unos límites de 45-60 g/L de producto. Se trata de trabajar en las condiciones nominales de 50 g/L. Este tanque se encuentra a una temperatura de 50-60 °C. La pieza se sumerge un tiempo entre 600-900 segundos. Requiere una agitación de aire mediante soplantes.

Las dimensiones de este baño son de 6,45x0,89x2,35 metros con una inclinación de las paredes de 0,5%. Teniendo un volumen de 13.500 L.

2.2.3 Prueba de Rotura de Agua

Esta prueba se realiza para verificar la eficacia de las etapas anteriores de limpiezas, y así poder seguir con el

sucesivo proceso. Se realiza tras el enjuague alcalino procedente de la limpieza alcalina y el enjuague ácido procedente del decapado ácido. En caso de no conformidad la pieza deberá reprocesarse hasta que pase la prueba.

Se trata de que al sacar la pieza del enjuague por inmersión se tenga una inspección visual de la progresión de la película de agua formada. El caso afirmativo ocurrirá cuando se observe una película continua de agua durante unos 30 segundos. Cuando no ocurre esto es debido a que sigue existiendo impurezas, restos de aceites y grasas, así que el agua se frenará y se romperá en pequeñas gotas [26].

2.2.4 Decapado Alcalino

Esta cuba construida en acero inoxidable está constituida por un producto comercial denominado Turco Aluminech, entre unos límite de concentración, 45 g/L de mínimo y 75 g/L de máximo. Se trabajará en un punto nominal aproximadamente de unos 58 g/L de Turco en el agua de calidad de tipo A. En este producto está compuesto mayoritariamente por NaOH por ello su carácter alcalino.

El intervalo de temperatura a la que se encuentra este baño oscila entre los 54-63 °C. El tiempo de inmersión de las piezas en él lo fija el factor de ataque, el cual se realizará diariamente, debe comprenderse dentro de los límites 1-2µm/min/cara. Este tiempo de inmersión será 5-6 minutos por pieza, mayores tiempos puede causar daños en la superficie de la pieza.

La finalidad del decapado alcalino es la eliminación de material para una posterior inspección de grietas [3].

La composición mayoritaria del Turco Aluminetch es la siguiente [28]:

- NaOH: 80-90%
- Ortofosfato trisodico: 1-10%

De nuevo este baño constará de un volumen del 13.500 litros y dimensiones de 6,45x0,89x2,35 metros con una inclinación de las paredes de 0,5%.

2.2.5 Prueba del factor ataque

Son ensayos que se deben de efectuar diariamente y trata de sumergir una fracción de metal, con las mismas composiciones y características que las piezas que se quieren tratar, durante un tiempo prefijado y así visualizar, mediante equipos especializados en medidas de espesores, los µm de superficie de la pieza por unidad de tiempo que son eliminados en ese baño.

También mediante instrumentos de medidas de pesos se observa el cambio de masa que se adhiere transcurrido ese tiempo.

Esta prueba marca el período que tienen que estar las piezas introducidas en el baño para una correcta ejecución y un perfecto acabado del tratamiento.

2.2.6 Decapado ácido (Desoxidado)

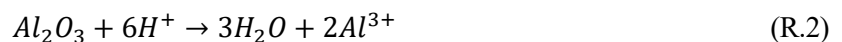
En el baño de desoxidado se quiere conseguir la eliminación de las partículas de óxido de la superficie y otras impurezas generadas en la limpieza alcalina, y así prepararlas para el próximo tratamiento, el anodizado.

Esta cuba de dimensiones 6,45x0,89x2,35 metros, con una inclinación de las paredes de 0,5% y un volumen de 13.500 litros se componen de agua de clase tipo A y un producto comercial libre de cromo denominado “Turco Smut Go liqued” en unas concentraciones entre 200-245 g/L.

Este producto se compone de [29]:

- Sulfato férrico: 10-30%
- Ácido Nítrico: 10-30 %
- Hidrogenodifluoruro de potasio: 1-5%
- Ácido sulfúrico: 0,1-1 %

Este producto ayuda la reacción de ácido nítrico con óxido de aluminio ya que el ácido se encuentra disociado en la solución y la capa de alúmina (Al_2O_3) reacciona con los protones presentes [26]:



El tiempo de inmersión de las piezas lo marca el factor de ataque, estando alrededor de los límites 0,5-2,5 $\mu\text{m/h/sup}$, entre 5-10 min. Requiere agitación mediante soplantes. Se trabaja en temperatura ambiente estando entre unos 20-40 °C.

2.2.7 Anodizado crómico

Las piezas se introducen en un baño electrolítico, la oxidación anódica debe su nombre a que las piezas a tratar actúan anódicamente, ya que el proceso implica la formación de una capa de óxido formada del mismo material y no introduciendo otros metales o productos.

El principio del anodizado es la electrólisis del agua, bajo los efectos de la corriente, los iones H^+ y OH^- del electrolito se dirigen hasta el cátodo y hacia el ánodo respectivamente. Se produce oxígeno naciente en el ánodo que al oxidar el aluminio le recubre de una película de óxido de aluminio. Esta película de alúmina es compacta, no deja pasar la corriente eléctrica, anhidra y porosa con gran poder absorbente [30].

La composición de este baño se trata de [3]:

- Cromo libre: 30-100 g/L
- Cromo total: 50-100 g/L
- Alúmina (Al_2O_3): 10g/L
- Cloruros: 0,2 g/L (NaCl)
- Sulfatos: 0,5 g/L (Na_2SO_4)

La densidad de corriente que circula por la pieza se encuentra entre unos 0,3-1 A/dm². Las medidas de esta cuba son 6,45x0,89x2,35 metros, con una inclinación de las paredes de 0,5% y un volumen de 13.500 L, se compone de agua de clase tipo A. El tiempo de inmersión de las piezas de aluminio es de aproximadamente 40 min. La temperatura se encuentra entre 32-37°C.

Uno de los aspectos importantes en el anodizado es el ciclo electrolítico ya que el espesor de la capa anódica es directamente proporcional tanto a la intensidad de corriente, como al tiempo que las piezas están sumergidas en el baño. El espesor de la capa anódica se encuentra entre 2 y 7 μm debido a la corriente de densidad y una tensión de 21 ± 1 V durante un tiempo de 40 ± 5 min. En la Figura 6 se muestra el ciclo electrolítico del anodizado.

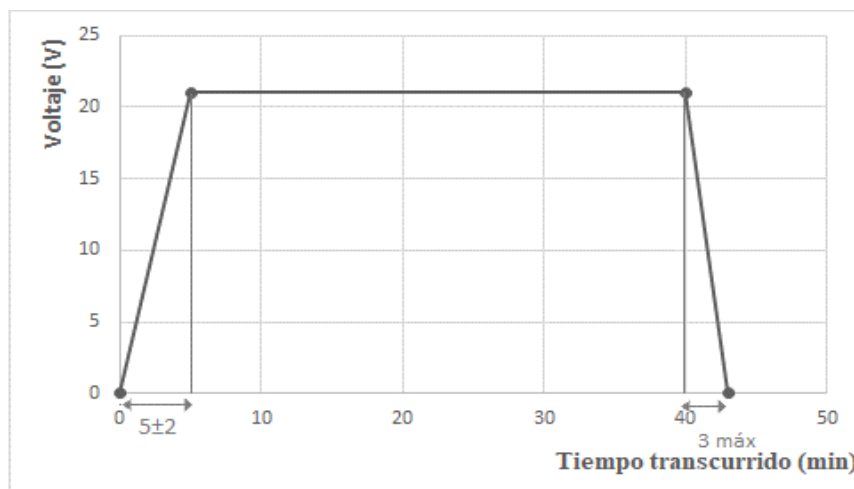


Figura 6: Ciclo electrolítico del anodizado [3].

2.2.8 Sellado

Es el tratamiento de mayor importancia y el que condiciona la resistencia a la corrosión de la capa anódica. Consiste en cerrar herméticamente los poros de la capa mediante hidratación, el sellado con dicromato sódico tiene como misión hacer que cada molécula de alúmina anhídrido tienda a fijar una molécula de agua, aumentando su volumen y cerrando los poros [3].

Las medidas de esta cuba son 6,45x0,89x2,35 metros, con una inclinación de las paredes de 0,5% y un volumen de 13.500 L. La temperatura que alcanza está entre los 97-100 °C. Y el tiempo de inmersión de la pieza alrededor a 15 min. Las condiciones de trabajo tratan un pH de 5,5-6,5.

La composición de la cuba de sellado es:

- Dicromato sódico: 50g/L
- Cr (VI): 45ppm
- Sulfatos: 440 ppm
- Cloruros: 330 ppm

Se realiza el proceso a una elevada temperatura de trabajo y se produce una gran evaporación de compuestos químicos, así que debe constar de un sistema de aspiración para evitar la emisión de productos perjudiciales para la salud del operario y del medio ambiente [3].

2.2.9 Secado

Para finalizar el proceso de anodizado de las piezas tienen que secarse con aire o en estufas de secado. El secado se produce por convección forzada de aire caliente sobre las piezas. Este aire está libre de agua, aceite y polvo. La estufa debe estar entre el rango de temperatura 45-60°C. Y el tiempo de inmersión transcurre entre unos 20 min.

Las medidas de esta cuba son 6,45x0,89x2,35 metros, con una inclinación de las paredes de 0,5% y un volumen de 13.500 litros. Tras el secado las piezas están libres de contaminación, incluido líquidos atrapados.

Todas las cubas estarán construidas en acero inoxidable y dispondrán de dos tapas de accionamiento neumático. Los baños que lo requieran estarán recubiertos por un aislante. Se producirán los tratamientos superficiales de manera discontinua y la disposición de los baños estarán en paralelo. Todos los baños dispondrán de agitación mediante soplantes.

2.2.10 Tabla resumen baños

En la Tabla 8 se muestra las características más relevantes de cada uno de los diferentes baños de proceso.

Tabla 8: Características más relevantes de los baños de la planta de tratamientos superficiales.

BAÑO	PRODUCTO	CONCENTRACIÓN	TEMPERATURA (°C)	TIEMPO DE INMERSIÓN (min)
<i>Desengrase Alcalino</i>	Turco 6849	15%	61-70	5-10
<i>Limpieza Alcalina</i>	Turco 4215 NC- LT	50 g/L	50-60	10-15
<i>Decapado Alcalino</i>	Turco Aluminetch	58g/L	54-63	5-6
<i>Desoxidación</i>	Turco Smut Go	200-245g/L	20-40	5-10
<i>Anodizado Crómico</i>	Cromo libre	40 g/L	32-37	40
<i>Sellado</i>	Dicromato sódico	50g/L	97-100	15
<i>Secado</i>	Aire	-	45-60	20

2.3 Características de las aguas

Todas las aguas presentes en la planta de tratamientos superficiales de esta industria aeronáutica son de calidad del agua grado/tipo A. En la siguiente Tabla 9 se refleja sus principales parámetros.

Tabla 9: Parámetros Agua Tipo A [3].

PARÁMETROS AGUA TIPO A	
<i>pH</i>	5-7
<i>Sólidos Disueltos totales</i>	10 ppm
<i>Conductividad</i>	10µs/cm
<i>Silicatos</i>	2ppm
<i>Cloruros</i>	1 ppm
<i>Dureza</i>	10 mg/L

Las MTD sobre este sector recomienda que en las cubas donde se producen los enjuagues:

- Agitación con aire para que no se produzca espuma debido a los tensioactivos de las cubas anteriores.
- Introducir el agua limpia por el fondo de la cuba
- Fijar la salida del agua sucia en el extremo opuesto al de la entrada [2].

La forma de enjuague que se realiza en el proceso es el enjuague simple, como se refleja en la Figura 7; se trata de una sola cuba que cuenta con una entrada y una salida de agua; y la pieza transcurre de una a otra en serie.

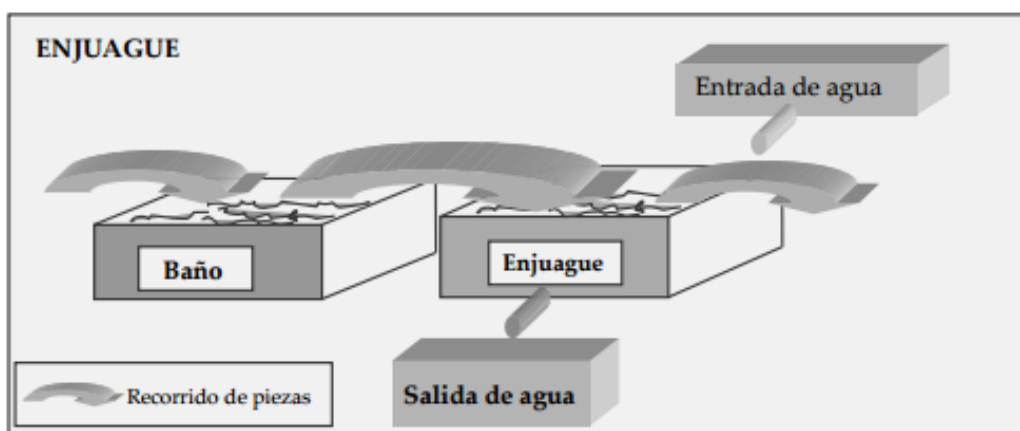


Figura 7: Técnica de Enjuague simple [2].

2.4 Porcentaje retenido en las piezas

Este cálculo de la cantidad de disolución del baño que queda retenido en las piezas es necesario para saber el caudal de llenado de los baños al final del día, y así cada cuánto tiempo hay que rellenarlo. Para ello se tiene que conocer el volumen total del baño y el volumen de las piezas que se introduce.

El volumen total del baño es de 135 m^3 , el cual por seguridad se encuentra llenado $\frac{3}{4}$, dejando $\frac{1}{4}$ vaciado para evitar el reboso.

Las piezas son cuadradas, mide 3 metros cada uno de sus lados y un espesor marcado por la cantidad de disolución, suponiendo que sea de 3 mm. Ver Figura 8. Se obtiene al final un volumen por pieza de $0,027 \text{ m}^3$.

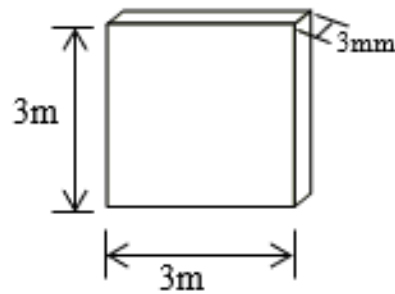


Figura 8: Piezas utilizadas en la planta.

Queda retenido un 0,026% del baño. Si al día se supone que pasan alrededor de 400 piezas, un 10,5% de la disolución que contiene la cuba queda retenida en las diferentes piezas. Esto supone, que al final del día, es necesario $10,63 \text{ m}^3$ de disolución para completar la cuba.

Los baños se deben de analizar cada día para controlar las diferentes pérdidas de propiedades que se tiene por adherirse la solución a la pieza.

2.5 Seguridad frente a los tratamientos superficiales

Ya que las cubas de aguas de enjuagues se encuentran descubiertas y las piezas retienen un tanto por cien del baño, se deben de tener unas ciertas de precauciones para proporcionar seguridad al trabajador.

Los principales riesgos son:

- Inhalación de vapores desprendidos en los procesos.
- Contacto con sustancias corrosivas y salpicaduras del líquido que contiene dichas cubas.
- Riesgo de explosión y/o incendio; puesto que muchos de las sustancias empleadas son inflamables.
- Reboses de los tanques [31].

El estudio de los riesgos de los trabajos proporcionado por estos tratamientos no está al alcance de este proyecto.

3. CARACTERIZACIÓN DE LAS AGUAS A DEPURAR

Cómo se ha visto en el apartado anterior, después de cada baño de proceso se dispone de un baño enjuague para conseguir una limpieza de los restos de sustancias aportados del tratamiento anterior y poder pasar al siguiente de manera óptima. Existen dos tipos de aguas: de carácter alcalino, con un pH más elevado y de carácter ácido, con un pH bajo. En este capítulo se habla de manera más específica de cada una de ellas y de sus contaminantes; finalizando con un pequeño subcapítulo que trata de la forma de trabajar de las cubas, reflejándolo en un Diagrama de Pert que tiene en cuenta la limpieza y los tanques de reservas.

3.1 Aguas de enjuague alcalinos

Las aguas de carácter alcalino de la planta se caracterizan porque su principal contaminante es el NaOH procedente de los detergentes o productos químicos añadidos en los baños de limpieza como desengrase, limpieza alcalina o decapado alcalino.

El pH propiamente alcalino se encuentra alrededor de 11-12. Las medidas de esta cuba son 6,45x0,89x2,35 m y un volumen de 13.500 L. El agua que contiene es de calidad tipo A. El tiempo de inmersión en este fluido es de 3-5 min. Este baño se encuentra a temperatura ambiente.

Para poder conseguir el tratamiento de este tipo de agua y eliminar los contaminantes es necesario elevar el pH hasta aproximadamente 9,5, para ello, se le adiciona hipoclorito sódico. En la Figura 9 se muestra el diagrama de las diferentes formas en la que se encuentra el cloro dependiendo del pH en el equilibrio.

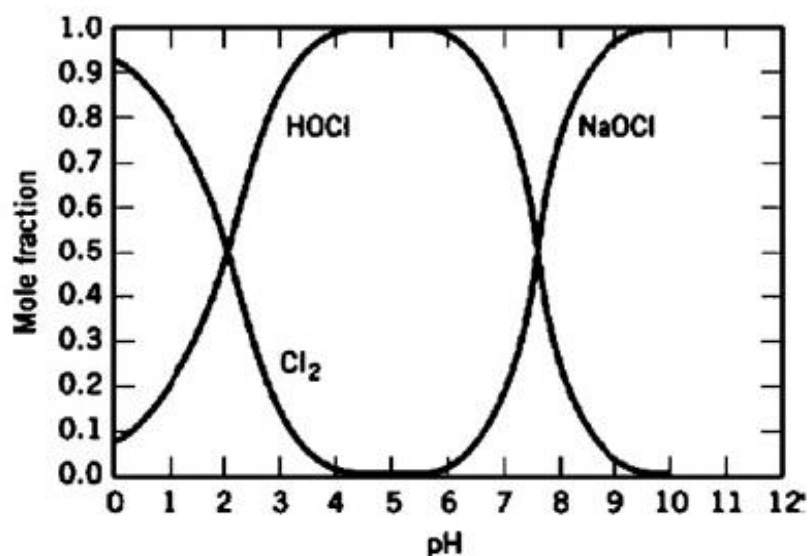


Figura 9: Equilibrio de una solución de cloro, ácido hipocloroso e hipoclorito sódico a 25 °C [32].

3.2 Aguas de enjuague ácidos

Estas aguas vienen procedentes de un baño ácido con una elevada concentración de contaminantes, ya que en él se produce el anodizado crómico del aluminio.

Tienen un pH muy ácido aproximadamente alrededor de 2. Las medidas de esta cuba son 6,45x0,89x2,35 m y un volumen de 13.500 litros. El agua que contiene es de calidad tipo A. El tiempo de inmersión en este fluido es de 5-10 min. El baño se encuentra a temperatura ambiente.

Esta agua es característica por contener Cr(VI) en mayor proporción, perjudicial para la salud. Se requiere un tratamiento para reducirlo a cromo trivalente, ya que este compuesto no es tan nocivo como el anterior.

Dejará de ser totalmente perjudicial una vez completado el método de depuración. Esta eliminación de Cr(VI) se lleva a cabo a través de un proceso de reducción. La Figura 10 muestra las diferentes formas en las que se encuentra el cromo.

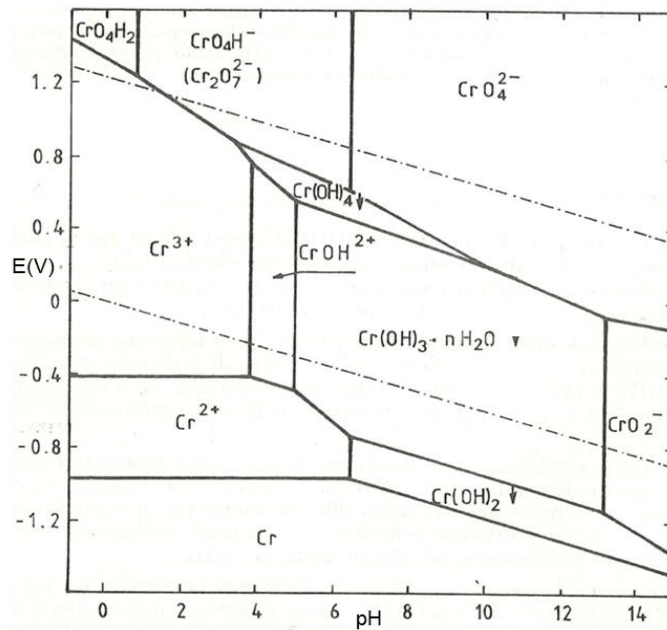


Figura 10: Diagrama de Pourbaix del Cromo [33].

El cromo con estado de oxidación 6 se encuentra de la forma de Dicromato ($Cr_2O_7^{2-}$) con un potencial elevado y un pH entre 2-6. Estas aguas bajan su estado de oxidación con la adición de agentes reductores, por ejemplo: ión bisulfito (HSO_3^-), produciéndose así un proceso de oxidación-reducción. Mientras que el cromo se reduce, el bisulfito se oxida.

3.3 Cuantificación de los contaminantes en los baños de lavado

Las aguas de lavado contienen varios de los contaminantes procedente de los baños de tratamientos. La sesión de depuración de estas aguas se basará en la depuración de dos de los grandes contaminantes principales: en las aguas ácidas: Cr(VI) y en las aguas alcalinas: NaOH. La Tabla 10 resume las concentraciones de estos baños.

Tabla 10: Concentración en g/L de los contaminantes de los baños de agua tras tratamientos.

BAÑOS	NaOH(g/L)	Cr(VI) (g/L)
1	40	-
2		-
3	49,3	-
4	-	-
5	-	40
6	-	0,045
TOTAL	89,3	40,045

Siendo:

- Baño 1: La cuba de limpieza tras el desengrase alcalino.
- Baño 2: El baño tras el tratamiento de limpieza alcalina.
- Baño 3: Las aguas tras el decajado alcalino.
- Baño 4: Lavado procedente del desoxidado.
- Baño 5: El baño de enjuague después del anodizado crómico.
- Baño 6: El enjuague tras el sellado.

Las aguas de carácter alcalino corresponden a la de los baños 1,2 y 3 mientras que las aguas ácidas incumben a los baños 4, 5 y 6. El baño 5 es el que mayor concentración de Cr(VI) contiene, el principal contaminante para eliminar. Por lo contrario, en el baño 4 no existe Cr(VI).

3.4 Forma de operación

La forma de trabajar de las cubas en la planta es de manera discontinua; es decir, existen tiempos de paradas por limpieza o por cambio de turno. En la siguiente Figura 11, se representa el Diagrama de Pert de la gestión de las cubas, una herramienta para la gestión llenado de las diferentes cubas. Quedan excluidos los procesos de llenado de los equipos posteriores al tanque de mezcla, el clarificador y el secador.

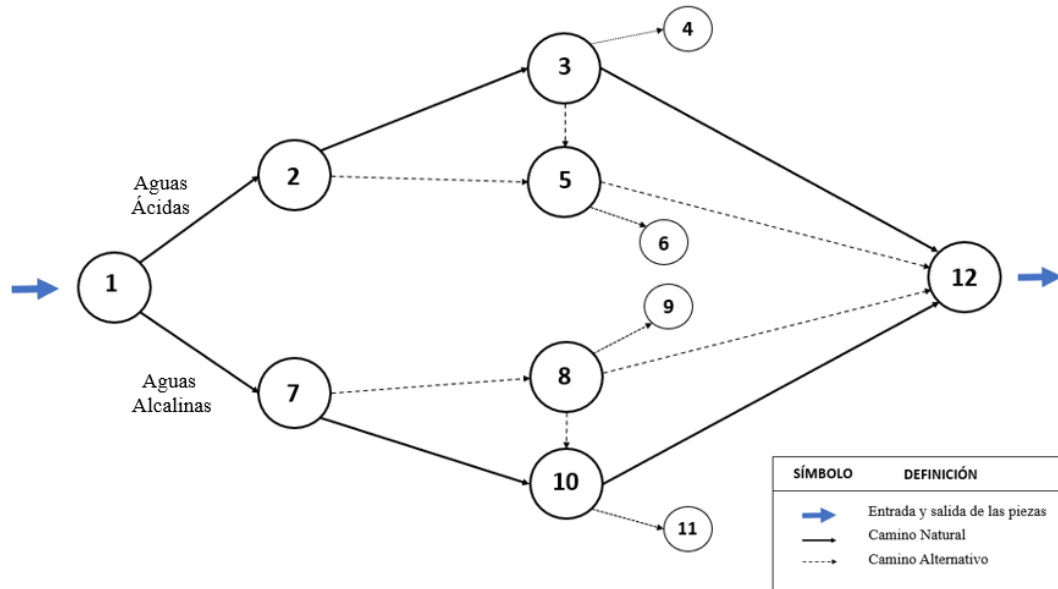


Figura 11: Diagrama de Pert de la gestión de las cubas.

La Tabla 11 define cada una de las actividades y se tiene en cuenta las siguientes pautas:

- Un ciclo de tratamiento de las piezas tiene una duración de aproximadamente de 2 horas; en los cuales 30 minutos se llevan a cabo en la parte donde se genera las aguas alcalinas, 1 hora en la zona donde se genera los residuos ácidos; ya que el anodizado cromo es el tratamiento de mayor duración, y 20 minutos en el secado.
- En cada ciclo se tiene en cuenta una hora para preparación de las piezas a tratar y recogida de piezas tratadas.
- Existen 3 turnos en la planta: Turno de mañana (06-14h), turno de tarde (14-22h) y turno de noche (22h-06h). Los domingos no se trabaja.
- Se trabaja un total de 18 horas en los tres turnos por lo que se realizan 6 ciclos al día: 2 por cada turno.
- El tanque de mezcla dispone de 1000 l/h, por lo que las corrientes aguas alcalinas y ácidas son de 500 l/h y tardan un día y un turno en llenarse los primeros tanques.
- Cuando el tanque se completa, se procede a descargar el agua en el tanque de mezclado y a una posterior limpieza.
- Cuando ocurre esto, comienza a llenarse el tanque de reserva; el caudal de agua líquida se encamina por el camino alternativo.
- Para la limpieza de los tanques se estima una duración de un día.

Tabla 11: Actividades del Diagrama de Pert para la forma que trabaja las cubas.

Actividad	Predecesora	Duración (h)
1	-	2
2	1	32
3	2	32
4	3	24
5	2,3	32
6	5	24
7	1	32
8	7	32
9	8	24
10	7,8	32
11	10	24
12	3,5,8,10	32

4. DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROCESO

A continuación, se presenta el diagrama de proceso elegido para la depuración de las aguas ácidas y alcalinas procedente de los tratamientos superficiales, viene determinado según la Figura 12 y una breve descripción del proceso. En el apartado próximo se diseña más específicamente cada uno de los equipos que lo componen.

El agua procedente de los tratamientos de las piezas viene de los tanques T-101 y T-104 y se recoge en los tanques, T-103, para las aguas ácidas y T-106 para las aguas alcalinas. Estos tanques tienen paralelamente otros de reserva, para el caso de rebose o inundaciones, T-102 y T-105. En el tanque T-101 se adiciona un agente reductor para bajar el estado de oxidación del Cr(VI); mientras que en el tanque de las aguas alcalinas se añade NaOCl para oxidar el cianuro y aumentar el pH. Ambas aguas podrían neutralizarse mezclándose, pero se elige la opción más rápida de reducir el principal contaminante, adición de sustancias químicas; ya que se trabaja en discontinuo, para mezclar se espera a que los tanques se llenen.

Estas aguas se combinan en el tanque de mezcla, T-107, con el pH requerido para poder eliminar el Cr(VI); para ajustar este pH se necesitan los tanques T-108 y T-109, los que contienen HCl para bajar el pH y NaOH para subir el pH. También se le adiciona cal para neutralizar las cargas de ambas aguas.

La masa de agua transcurre hacia el equipo del clarificador secundario, C-101, y una vez que se añade los floculantes y coagulantes las partículas indeseables sedimentan, y salen por la parte inferior del equipo, mientras que el agua líquida, sin contaminantes, sale por la parte superior y es reutilizada en el interior de la planta; si esta agua no cumple con los límites establecidos será devuelta al tanque de mezcla para una mejor depuración.

El lodo húmedo hallado en el clarificador secundario es conducido a un equipo secador, S-101, donde se elimina el agua contenida. Esta agua es reintroducida al tanque de mezcla, mientras que el lodo ya seco es enviado a un tratamiento de lodo fuera de la planta depurada.

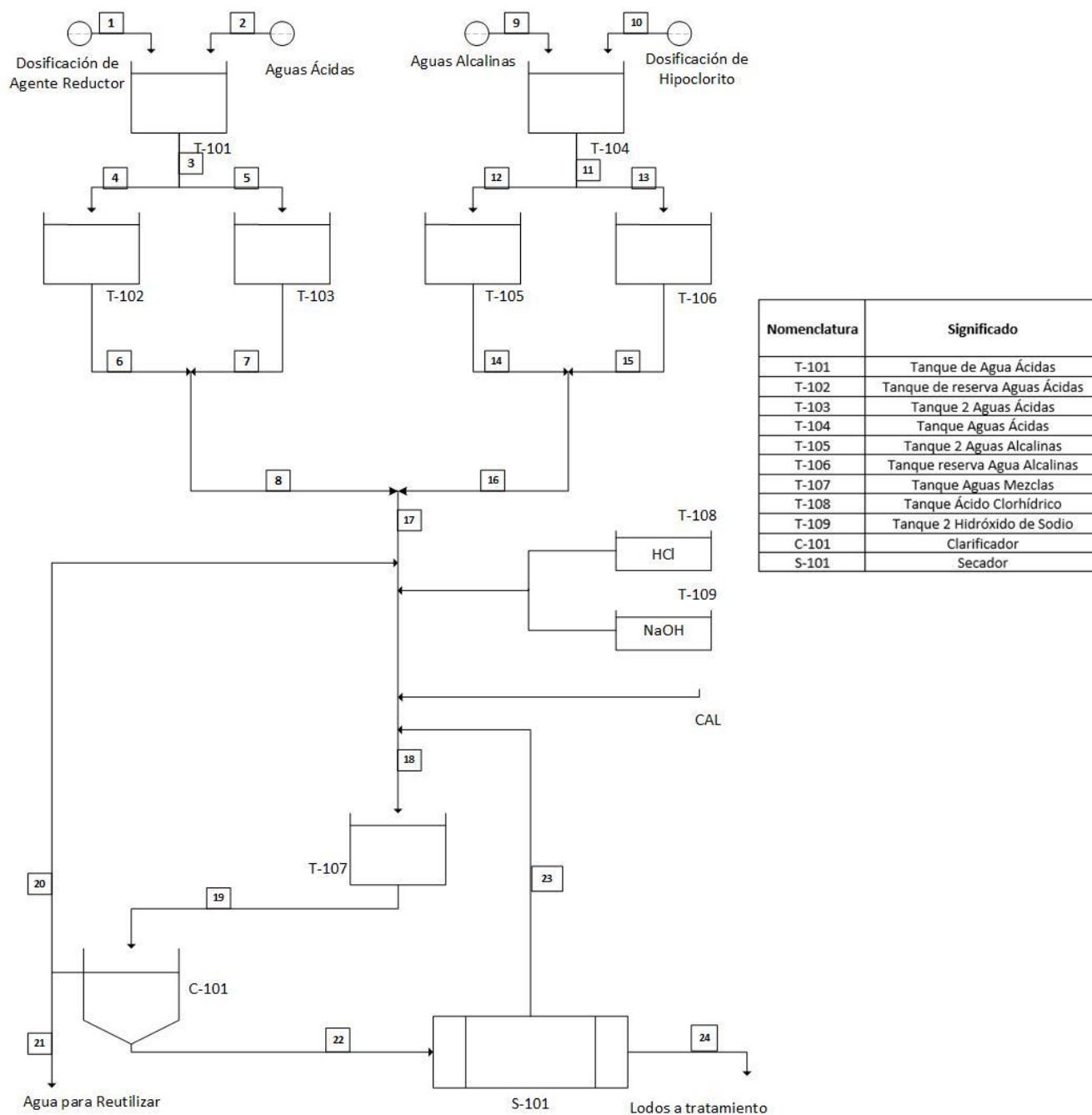


Figura 12: Diagrama del proceso de depuración de las aguas residuales

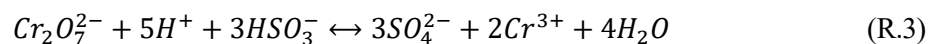
5. DISEÑO DETALLADO DE EQUIPOS

El principal objetivo del proyecto es el diseño de un proceso de depuración de las aguas residuales de una industria aeroespacial, para ello es necesario diseñar los diferentes equipos que componen dicha planta de depuración. Como se ha explicado en el capítulo 5, el proceso consta principalmente cuatro etapas. Por tanto, en primer lugar, se tiene que calcular la dosis de agente reductor que hay que añadir para la reducción del Cr(VI) a Cr(III), seguidamente la dosis de hipoclorito que hay que añadir en el baño para reducir el pH de las aguas alcalinas.

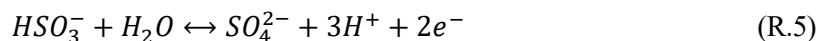
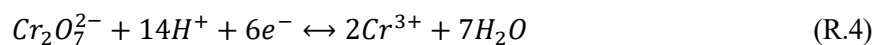
Se dimensiona también el decantador o clarificador con su respectiva adición de coagulante y floculante, para este diseño se tiene en cuenta la velocidad terminal de las partículas sedimentables con su respectivo Reynold. Por último, se estima el caudal de aire necesario para secar el lodo generado del equipo anterior

5.1 Cálculo de la dosificación agente reductor

Como agente reductor se ha elegido el bisulfito de sodio. Cuando este compuesto se añade al baño es capaz de reducir Cr(VI) en forma de dicromato a Cr(III), según la Reacción 3.



Siendo ésta la reacción global formada por una semirreacción de Oxidación, Reacción 4, y una semirreacción de Reducción, Reacción 5.



Como se sabe que la concentración de contaminante es el tanque es de 40 gCr(VI)/L, es decir la concentración de 0,8 M Cr(VI). Este tipo de Cromo se encuentra como dicromato, así que se tiene 0,4M $Cr_2O_7^{2-}$. Por tanto y siguiendo la estequiometria de la Reacción 3: Un mol de Cr(VI) equivale a dos moles de Cr(III), 0,8M Cr(III).

Tres moles de dicromato equivalen a uno de bisulfito, entonces se tiene que añadir 1,2 M de bisulfito de sodio para reducir esta cantidad de contaminante.

Según la normativa empleada en la industria aeronáutica se selecciona un tanque de dimensiones 6,45x0,89x2,35 m, en forma de pirámide invertida, con un volumen de 13.500L, ver Figura 13.

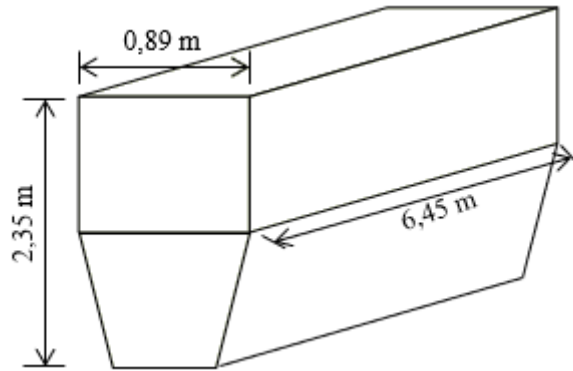


Figura 13: Tanque de almacenamiento.

Según las mejores técnicas disponibles (MTD), se considera que el diseño de los tanques debe de:

- Disponer de una doble pared para almacenar materiales con riesgo.
- Siempre que sea posible, fabricadas con materiales resistentes a los productos y corrosión.
- Dotarlas de elementos impermeabilizados.
- Se recomienda, para poder permitir la inspección por debajo de ellas, que las cubas se dispongan a unos 30 cm del suelo [22].

5.2 Cálculo de la dosificación de hipoclorito

A continuación, es necesario subir el pH para conseguir uno propiamente alcalino, mayor de 7, 9,5 aproximadamente, [34], en la curva de equilibrio de la solución de Cl_2 , HOCl e NaOCl a 25 °C, ver Figura 14, para conseguir un pH tan alto hay que añadir una fracción molar de 0,95 de NaOCl .

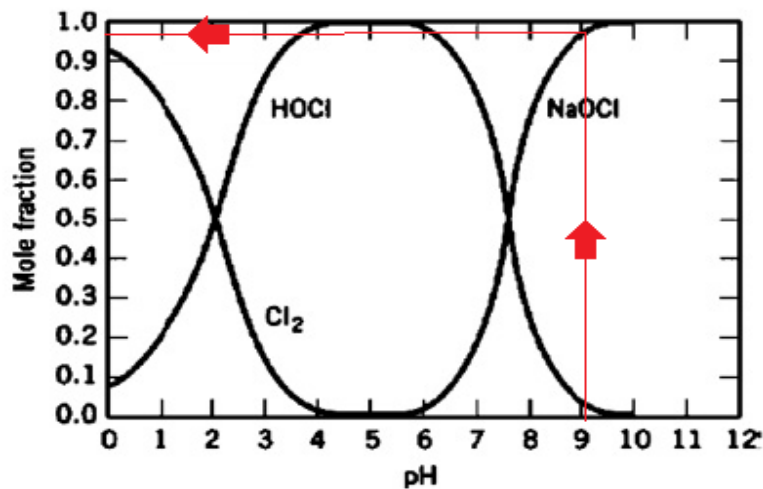


Figura 14: Fracción molar para un pH de 9,5.

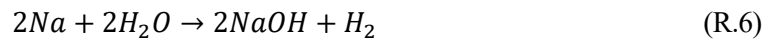
El eje de coordenadas indica la fracción molar de lo que hay que añadir a la solución para alcanzar el pH deseado. Viene determinado por la siguiente Ecuación 1 y 2.

$$\left(\frac{n_{NaOCl}}{n_{totales}}\right) = 0,95 \quad [\text{Ec. 1}]$$

$$n_{totales} = n_{NaOCl} + n_{H_2O} + n_{NaOH} \quad [\text{Ec.2}]$$

Siendo n_{NaOCl} los moles/L que hay que añadir a la solución y el $n_{totales}$ la suma de los moles/L presentes en el baño: NaOCl, H₂O y NaOH.

El baño parte de una concentración de NaOH de 89 g/L y se está dando la siguiente Reacción 6.



Por estequiometría se tiene los mismos moles/L de agua que de NaOH; es decir 2,22 moles/L de agua y 2,22 moles/L NaOH. Con estos valores y las Ecuaciones 1 y 2 se tiene una adicción de 84,4 M (moles/L) de hipoclorito de sodio.

Se añade 6,3 kg de NaOCl en nuevas cubas, pero con el mismo volumen que las de agua ácidas de 13.500 L, con dimensiones de 6,45x0,89x2,35 m, en forma de pirámide invertida. Ver Figura 13.

5.3 Clarificador

Este método de separación de partículas en suspensión de un líquido por gravedad debido a las condiciones de sedimentación se utiliza en gran medida convirtiendo partículas finas en partículas más gruesas debido a la adicción de agente floculantes y coagulantes. Este proceso se realiza en tanques grandes abiertos llamados clarificadores o espesadores [35]. De este equipo se obtiene dos corrientes: la suspensión concentrada es filtrada por otro equipo posterior; mientras que el líquido limpio o casi limpio de partículas es utilizado para vertido o cualquier utilidad para el agua con estas características.

5.3.1 Adicción de Coagulantes

Cuando los sólidos en suspensión son principalmente partículas individuales de diminuto diámetro, la velocidad de sedimentación por gravedad será muy lenta, por ello, se ha de conseguir que las partículas formen aglomeraciones o agregados de partículas que sedimenten a una velocidad razonable [35]. Estos flóculos no se definen con facilidad, por tanto, el diseño de los espesadores se va a basar en la medida de la velocidad de sedimentación [35].

La coagulación y floculación sedimentan partículas entre 10^{-4} - 10^{-9} m [33]. La coagulación consiste en la agregación de partículas en suspensión [33]. El coagulante elegido para añadir a los baños para reducir los sólidos en suspensión es el cloruro de hierro.

La cantidad de dosificación escogida ha sido según una práctica de laboratorio en la que se añade 70-80 mg de coagulante para 250 mL de muestra, formada por agua y cromatos [34]; si el tanque o cuba en el que se añade es de 135 m³, el valor de este experimento se extrapola a esta cantidad de agua, siendo necesario la adicción de 37,8 kg FeCl₃/L.

5.3.2 Adicción de Floculantes

De la misma manera que los coagulantes, la adicción de floculantes para aumentar los flóculos. El floculante elegido es el polielectrolito en forma líquida, ya que presentan una toxicidad oral baja y no presentan ningún problema anormal en su manipulación, también se trata de una alternativa de bajo costo [36] [37].

En la práctica se añade 1 mL por cada 250 mL de muestra; [32] extrapolando dicho dato se ha de añadir 540 L de floculantes para una cuba de 135 m³.

5.3.3 Tiempo mínimo para la sedimentación de las partículas

Para conocer el tiempo mínimo que tardan las partículas en irse al fondo del clarificador se necesita saber la velocidad terminal o de sedimentación de las partículas y la altura del tanque. La caída del sólido o sedimentación se debe al efecto de la gravedad al que se someten las partículas que se encuentran en suspensión en un fluido [38]. El tamaño de las partículas influye a la hora de calcular la velocidad mínima de sedimentación. Con esta velocidad se podrá calcular el diámetro mínimo que debe de tener el decantador para que sedimenten las partículas.

Para caracterizar el movimiento de las partículas en el fluido hay que calcular en número de Reynolds (Re); es un número adimensional, ver Ecuación 3.

$$Re_p = \frac{\rho u_o D_p}{\mu} \quad [\text{Ec.3}]$$

Donde:

- Re es el número de Reynold para las partículas. (Adimensional)
- ρ es la densidad del fluido en kg/m³.
- u_o es la velocidad del fluido en m/s.
- D_p es el tamaño de las partículas en m.
- μ es la viscosidad del fluido en kg/m·s.

Estimando un valor de partículas de 100 μ m, en forma de aglomeraciones esféricas, una velocidad del fluido de 0,01 m/s y tomando el fluido como si fuera agua pura en condiciones normales de, se tiene una densidad de 1000 kg/m³ y una viscosidad de 10⁻³ kg/m·s se tiene un valor del número de Reynold de 1·10⁻⁴. Al ser un Reynold menos que 2000 se trata de un flujo laminar [39].

La velocidad máxima que puede alcanzar la partícula se denomina la *velocidad terminal* que viene dada de forma general por la Ecuación 4.

$$u_t = \sqrt{\frac{2g(\rho_p - \rho)m_p}{A_p \rho_p C_D \rho}} \quad [\text{Ec.4}]$$

Donde:

- u_t es la velocidad terminal del fluido en m/s.
- g es la constante de gravedad, m/s²
- ρ_p es la densidad de la partícula en kg/m³.
- ρ es la densidad del fluido en kg/m³.
- A_p es el área de la partícula en m².
- C_D es el coeficiente de rozamiento, adimensional.
- m_p es la masa de la partícula en kg.

En un movimiento de partícula esféricas de diámetro D_p , la masa y el área transversal vienen definidas según la Ecuación 5 y 6.

$$m = \frac{1}{6} \pi D_p^3 \rho_p \quad [\text{Ec.5}]$$

$$A_p = \frac{1}{4} \pi D_p^2 \quad [\text{Ec.6}]$$

Al sustituir la masa y el área transversal, Ecuaciones 5 y 6 en la ecuación general, Ecuación 4, se tiene la Ecuación 7.

$$u_t = \sqrt{\frac{4g(\rho_p - \rho)D_p}{3C_D \rho}} \quad [\text{Ec.7}]$$

Existen dos casos límites para la velocidad terminal, para valores del coeficiente de rozamiento, para valores muy elevados o muy bajos, este último caso es el de este proyecto. Para valores muy bajos de número de Reynold de la partícula, el coeficiente de rozamiento varía inversamente proporcional al este, según la Ecuación 8 [35].

$$C_D = \frac{24}{Re_p} \quad [\text{Ec 8}]$$

En la Figura 15, se representa los coeficientes de rozamiento par esferas, discos y cilindros contra el número de Reynolds. Y se verifica que, para Reynold pequeños, estimando un Reynold de partículas pequeño se obtiene número de coeficiente de rozamientos muy elevados.

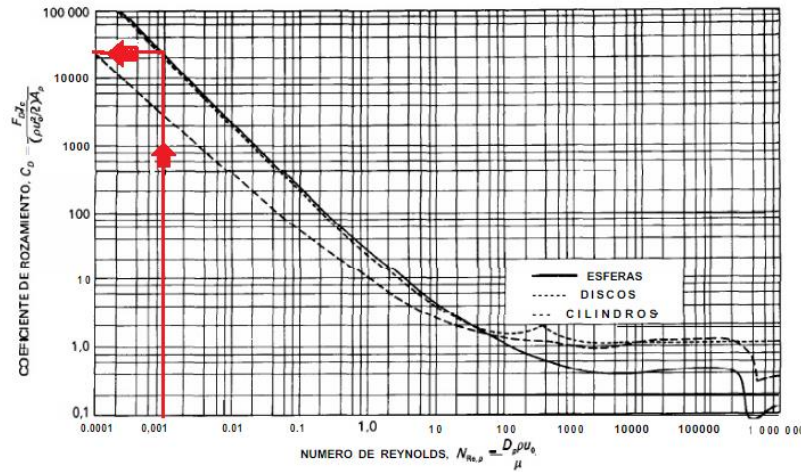


Figura 15: Coeficientes de rozamientos para esferas, discos y cilindros [6].

La velocidad terminal, por tanto, viene determinada por una forma de la Ley de Stokes, ver Ecuación 9, utilizada para Reynold inferiores de 1 [35].

$$u_t = \frac{D_p^2(\rho_p - \rho)g}{18\mu} \tag{Ec.9}$$

Donde D_p es el diámetro de la partícula en μm ; g es la constante de gravedad en m/s^2 ; ρ es la densidad del fluido, en este caso agua; 1000 kg/m^3 ; ρ_p la densidad del sólido; considerando que el sólido tiene la misma densidad que el floculante utilizado, polielectrolito; 1200 kg/m^3 [39].

Se tiene una velocidad terminal de $0,002 \text{ m/s}$.

La utilización de la teoría de Stokes presenta una serie de inconvenientes [41]:

- El peso específico de todas las partículas no es el mismo al tratarse de sólidos de diferentes composiciones.
- Las partículas no son totalmente esféricas y cada una de ellas diferentes.

Una vez conocida la velocidad terminal y conocida la altura del clarificador se puede conocer el tiempo mínimo que tarda la partícula en llegar al fondo del equipo. Los valores típicos de altura se encuentran entre $2\text{-}4 \text{ m}$; [42] para el proceso se precisa el caso más desfavorable de una altura de 4 m . Según la Ecuación 10, se obtiene el tiempo mínimo requerido para la sedimentación del contaminante.

$$t_R = \frac{H}{u_t} \tag{Ec.10}$$

Siendo:

- t_R el tiempo mínimo que tarda una partícula en llegar a la parte inferior del clarificador en segundos.
- H es la altura del clarificador en m .
- u_t es la velocidad terminal del fluido en m/s .

Obteniéndose un tiempo mínimo de caída de 200 segundos.

5.3.4 Clarificador Secundario

Este tipo de equipo posee un símil con el clarificador primario, ya que permite sedimentar la corriente teniendo dos salidas, una corriente de sólidos y otra de agua clarificada. El objetivo de la decantación es reducir los sólidos que se encuentran en suspensión bajo la acción de la gravedad [41]. Por ello, solo se pretende separar los sólidos sedimentables y la materia flotante.

Los decantadores circulares normalmente consisten en una cuba construida de hormigón, en donde la alimentación se realiza por la parte central, y la salida se lleva a cabo a través de un vertedero periférico [41].

Para el cálculo del área y el diámetro se hace un pequeño balance de materia en el que entran unos 101,5 m³/h divididos en 101 m³ de agua que llena el decantador suponiendo que se llena ³/₄ del tanque de mezcla y 0,54 m³ de floculantes añadidos. Esta cantidad de agua contiene 40 g/L de contaminantes y se quiere llegar a una concentración de salida óptima para poder conseguir un agua aceptada para poder ser vertida posteriormente, para ello se le añade 37,8 kg de coagulante, así se tiene una concentración a la salida de 3788 g/L de sólidos.

La velocidad terminal de las partículas se considera la calculada en el apartado anterior de 0,002 m/s es decir 7,2 m/h. El flujo mínimo descendente (G_{min}) viene determinado según la Ecuación 11.

$$G_{min} = \frac{v_t}{\frac{1}{C_{in}} - \frac{1}{C_u}} \quad [\text{Ec.11}]$$

Siendo:

- G_{min} el flujo mínimo descendente en g/m²h.
- v_t la velocidad terminal de las partículas en m/h.
- C_{in} es la concentración de sólidos a la entrada en g/L.
- C_u es la concentración de fangos a la salida en g/L.
- Se tiene un flujo mínimo de 288,3 g/m²h.

Con este flujo se determina el área mínima requerida para este clarificador secundario, según la Ecuación 12.

$$A_{min} = \frac{Q_o C_{in}}{G_{min}} \quad [\text{Ec.12}]$$

Donde:

- A_{min} es el área mínima requerida en m².
- Q_o es el caudal de líquido de entrada en L/h; estimándose un valor de 1000 L/h.
- C_{in} es la concentración de sólidos a la entrada en g/L; 40 g/L.
- G_{min} es el flujo mínimo descendente en g/m²h obtenido anteriormente; 288,3 g/m²h.

Se requiere un área de aproximadamente 139 m². Aplicando un coeficiente de seguridad de 1,35 [42], se tiene un área de aproximadamente de 188 m².

Con esta nueva área se puede hallar el diámetro con la Ecuación 13.

$$A_{min} = \frac{\pi}{4} D_c^2 \quad [Ec.13]$$

Siendo A_{min} en m^2 de $139 m^2$ y D_c el diámetro en m igual a 16 m.

Según la Escuela de Organización Industrial, EOI, en una publicación sobre la sedimentación/aguas verifica que dicho diámetro pertenece en el rango de las normas generales de diseño de los decantadores circulares [41].

- La mayor parte de los fabricantes han normalizado que los diámetros de los tanques circulares oscilan entre 5 y 60 m [40].
- La altura útil se encuentra entre 2,5 y 4,0 m [41].

5.4 Secador

Una vez que se obtiene un residuo con un tanto por ciento de agua del decantador se elige la opción de separar ese líquido y recircularlo de nuevo al interior de la planta para poder conseguir una mayor cantidad de agua residual. Para ello se utiliza un equipo de secado de sólidos. El secado, por lo general, es la etapa final de una serie de procesos y el producto extraído suele ser un producto final, en este caso los lodos o fangos obtenidos se enviarán a un posterior tratamiento que no entra en el alcance de este trabajo de fin de carrera [35].

El secado consiste básicamente en una corriente de gas que circula a través del sólido en contracorriente con una velocidad suficiente para que se pueda llevar a cabo la separación [35]. Para poder llevar a cabo esta separación se tiene que controlar la temperatura que depende de la naturaleza y contenido de líquido del material de alimentación, de la temperatura del medio de calentamiento, del tiempo de secado y de la temperatura que soportan los sólidos [35].

El patrón de temperatura, ver Figura 16, para el secador adiabático en contracorriente. El sólido se calienta rápidamente hasta la temperatura de evaporación del líquido, en este caso del agua, hasta unos $100^{\circ}C$, esta temperatura puede variar a lo largo del secado. Transcurridos el tiempo de secado, los sólidos pueden calentarse a temperaturas mayores que la de evaporación en una longitud relativamente corta del secador ya que requiere menor energía calentar los sólidos secos. El gas caliente, aire, entra al secador con alta temperatura, con poca humedad, y sale a una temperatura menor debido a la transferencia de calor hacia el sólido [35]. El secado de sólidos húmedos es entonces un proceso térmico.

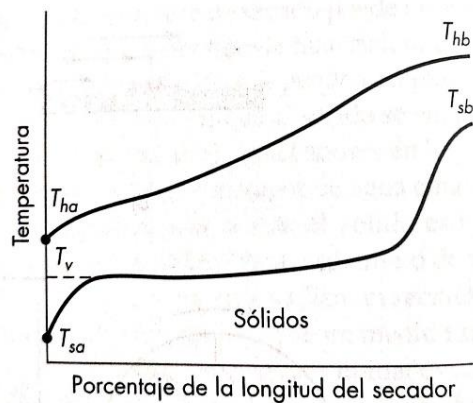


Figura 16: Modelo de temperaturas en un secador adiabático continuo en contracorriente [35].

La alimentación del calentador que se encuentra en la planta depuradora de las aguas procedentes de tratamientos superficiales de la industria aeronáutica viene determinada por un caudal de sólidos de 37,8 kg/h de los cuales un 60% se trata de agua [2], según las mejores técnicas disponibles; es decir, el lodo tiene un contenido en agua de 22,68 kg/h .

Al ser agua líquida pura, el calor específico en kJ/kg·K a una temperatura media de entrada, suponiendo temperatura ambiente 25°C y una temperatura de salida igual al cambio de fase de agua líquida a gas, 100°C, tiene un valor de 4,2 kJ/kgK, ver Tabla X2 del Anexo I [43] La energía necesaria para conseguir evaporar esta agua, es decir el calor de vaporización a presión atmosférica es de 2257 kJ/kg, valor obtenido de la Tabla X1 del Anexo I [43].

Del mismo modo el calor específico del aire, para una temperatura de entrada de la corriente gaseosa de 150°C y una temperatura de salida estimada de 50°C, es de 1,2 kJ/kgK, ver Tabla X3 del Anexo I [43].

Estos valores son sustituidos en las siguientes Ecuación 14, para así poder ofrecer un caudal estimado de aire que se ha de introducir en el equipo para poder llegar a eliminar la mayor cantidad de agua del sólido.

$$\dot{m}_{H_2O} C_{p_{H_2O}} (T_{vap} - T_{inH_2O}) + \dot{m}_{H_2O} \lambda_{H_2O} = \dot{m}_{aire} C_{p_{aire}} (T_{inair} - T_{outair}) \quad [Ec.14]$$

Siendo:

- \dot{m}_{H_2O} el caudal másico de agua en kg/h
- $C_{p_{H_2O}}$ es el calor específico del agua en kJ/kgK.
- T_{vap} la temperatura de vaporización del agua en °C.
- T_{inH_2O} la temperatura de entrada del fluido líquido en °C.
- λ es el calor de vaporización del agua a presión atmosférica, kJ/kg
- \dot{m}_{aire} el caudal másico de aire en kg/h.
- $C_{p_{aire}}$ el calor específico del aire en kJ/kgK.
- T_{inair} la temperatura de entrada del aire en °C.
- T_{outair} la temperatura de salida del aire en °C.

El equipo requiere un caudal de 486 kg/h de corriente gaseosa. En cuanto al diámetro del secador, los diámetros de los secadores rotativos están comprendidos entre 1-3 metros, y se tiene una relación de Longitud/Diámetro igual a 6, por tanto, la longitud del secador es de aproximadamente 12 metros [35].

El residuo obtenido del secador es un lodo caracterizado principalmente por contener Cr(III), no se trata de un material pulverulento, ya que se obtiene un tamaño de partícula mayores a los perjudiciales para la salud, de unos 100 μm . El cromo es un metal duro así que no hay problema de almacenamiento a la intemperie. Se trata de un residuo peligroso ya que pertenece a unos de los grupos de residuos peligrosos del Anejo 2 del Real Decreto 952/1997; este tipo de tratamiento se incluyen en Grupo 11: “Residuos Inorgánico que contienen metales procedentes del tratamiento y revestimiento de metales y de la hidrometalurgia no férrea”; en concreto el punto 3, “Residuos sin cianuro que contienen cromo”, por ello se requiere un mayor control y tratamiento especiales [44].

5.7 Tabla resumen de resultados

En la Tabla 12, se hace un resumen del diseño completo del proceso físico-químico que se emplea en la planta para la depuración de las aguas residuales del proyecto; el cual se divide en 4 etapas y se especifica las dosis de sustancias añadidas y el diseño de cada uno de los equipos que lo componen.

Tabla 12: Tabla resumen resultados equipos del diagrama de proceso

TABLA RESUMEN RESULTADOS		
Parámetro	Valor	Unidad
<i>Etapa 1: Dosis de Agente reductor (Aguas Ácidas)</i>		
Bisulfito de sodio	1,2	M
<i>Etapa 2: Dosis de Hipoclorito (Aguas Alcalinas)</i>		
Hipoclorito de sodio	84,4	M
<i>Etapa 3: Clarificador</i>		
Cloruro férrico (Coagulante)	37,8	kg/L
Poliectrolito (Floculante)	540	L
Velocidad terminal	0,02	m/s
Tiempo mínimo de sedimentación	200	s
Área mínima clarificador	139	m ²
Diámetro clarificador	16	m
<i>Etapa 4: Secador</i>		
Caudal de agua en lodos	22,68	kg/h
Caudal de aire	485,32	kg/h
Diámetro	2	m
Longitud	12	m

6. DISEÑO DEL SISTEMA DE CONTROL BÁSICO

En este apartado se propone un sistema de control básico para la planta de tratamiento del agua para la eliminación del compuesto principal, el cromo, procedente de los tratamientos superficiales previos a las piezas. Este control permite que de manera automática se pueda corregir cualquier perturbación que ocurra a lo largo del proceso. En la Figura 17 es una imagen que representa el diagrama de instrumentación de la planta que se encuentra en el Plano I del Bloque III. Se explicada como se controla cada una de las variables del proceso con sus respectivos lazos.

- Lazo 01: control del nivel de los tanques de las aguas ácidas. Se mide, con un indicador de nivel (LC), el nivel que se alcanza en el tanque principal, con un límite del $\frac{3}{4}$ nivel de llenado, si supera este valor, se cierra la válvula y se abre la correspondiente al tanque de reserva, para así evitar reboses.
- Lazo 02: control del nivel de los tanques de aguas alcalinas de la misma manera que el Lazo 01.
- Lazo 03: control del caudal que pasa de aguas ácidas al tanque de mezcla.
- Lazo 04: control del caudal que pasa de aguas alcalinas al tanque de mezcla.
- Lazo 05: con este lazo se controla el pH, subiendo o bajandolo. Un indicador marca a qué medida de acidez o alcalinidad se encuentra y para alcanzar el pH requerido en el tanque de aguas mezcladas se abre las válvulas correspondientes para la adición de HCl o NaOH. De la misma manera, para neutralizar las cargas de dicha agua se adiciona Cal.
- Lazo 06: son las alarmas de nivel que se encuentran en el tanque de mezcla, una marca un nivel muy alto del tanque y, por lo contrario, otra marca un nivel muy bajo. Estas alarmas solo sirven para avisar al operario del estado del tanque.
- Lazo 07: control del caudal que pasa al decantador.
- Lazo 08: se controla la composición del agua obtenida en el decantador. Se mide la composición con un indicador de calidad a la salida del decantador; si se obtiene los valores de cromo dentro de los límites establecidos, dicha agua sale de la planta y se reutiliza en la misma planta para la limpieza de las próximas piezas; si no cumple con los valores se abre la válvula de recirculación hacia el tanque de mezcla hasta conseguir una mejora en la composición.
- Lazo 09: controla la humedad de los lodos obtenidos en el decantador a la salida del secador, se requiere un lodo más seco y así aprovechar esa agua separada. Esta humedad se controla a través de la temperatura de salida; cuando se tenga mayor humedad habrá que aumentar la temperatura del secador.

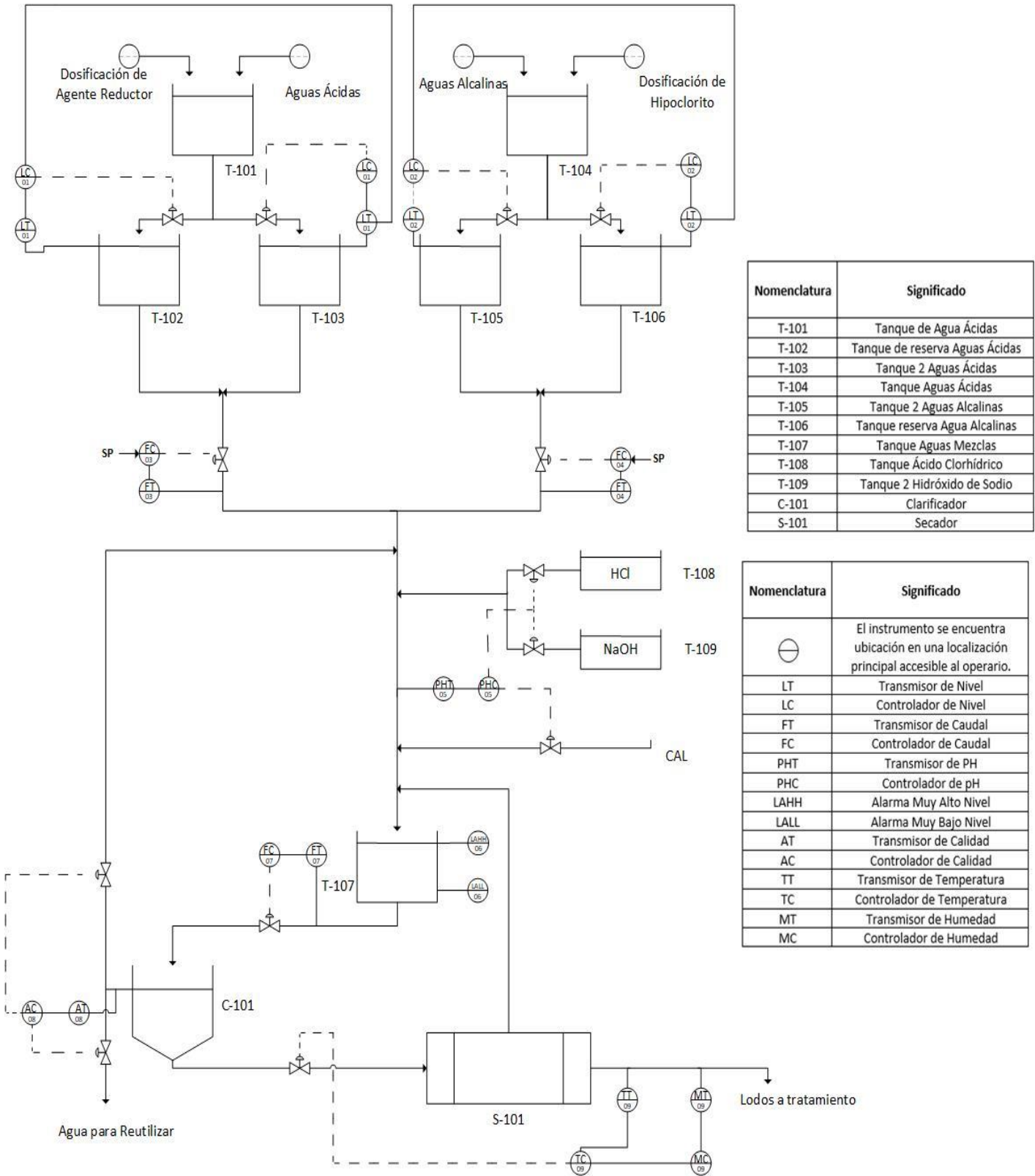


Figura 17: Diagrama de instrumentación de la planta depuradora de las aguas

7. IMPLANTACIÓN Y DISTRIBUCIÓN EN LA PLANTA

Este apartado tiene como objetivo la búsqueda de una zona disponible para la localización, ubicación, implantación y distribución de los diferentes equipos en la planta.

7.1 Búsqueda de la localización

La determinación de la localización viene exigida por un terreno lo suficientemente extenso para que se pueda repartir las diferentes partes del proceso de tratamientos superficiales; es decir, la planta en la que se produce los tratamientos, con su zona de personal, y la planta de depuración de las aguas proporcionadas por estos tratamientos. Se escoge el municipio de Dos Hermanas, Sevilla; concretamente en el Polígono de la Isla; calle Torre de Herberos nº3. Este polígono se encuentra a 15 km al sur de Sevilla y a 10 km del centro del municipio de Dos Hermanas, Ver Figura 18.

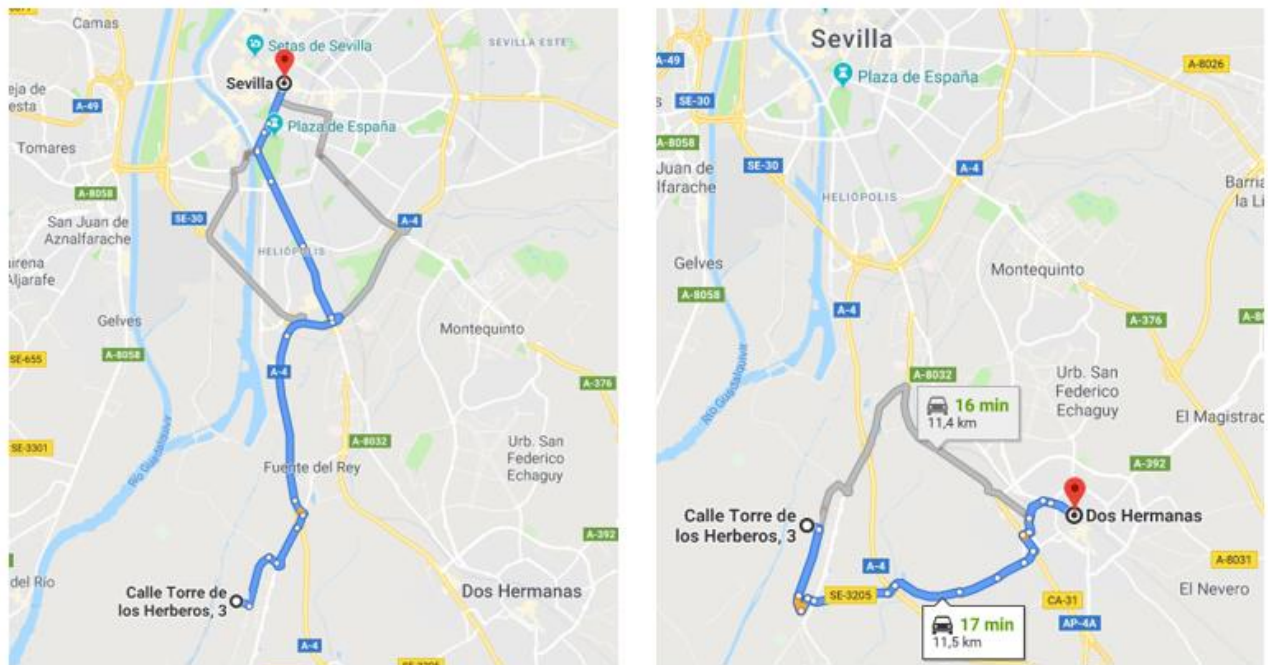


Figura 18: Localización de la calle Torre de los Herberos con respecto a las vías de acceso desde Sevilla y Dos Hermanas.

Las vías de acceso a esta localización se hallan en las carreteras de la red de itinerarios para Mercancía Peligrosas (RIMP) del Anexo IV de la Disposición 403 del BOE de la Dirección General de Tráfico [45].

El factor fundamental a tener en cuenta en la elección de la localización del solar es el clima; la temperatura media anual en Sevilla es de unos 19 °C [46]. Una temperatura idónea para los procesos que requiere la planta, ya que los procesos de depuración se llevan a temperatura ambiente. Los meses de invierno son más lluvioso que los de verano, pero no es una ciudad característica por las lluvias. La velocidad media corresponde a brisa débil; es decir de 12-19 km/h [47]. El terreno seleccionado se encuentra cerca de un afluente del río Guadalquivir, el río Guadaíra, según se muestra en la Figura 19, se trata de una imagen del Plano II, que se encuentra en el bloque III. El terreno tiene una expansión 41.200 m².

Otros de los aspectos que predomina es la accesibilidad externa al terreno; es decir, la ubicación se encuentra cerca del puerto de Sevilla, cerca de la estación de trenes y es accesible por carretera. Se dispone de energía eléctrica y otros servicios básicos.

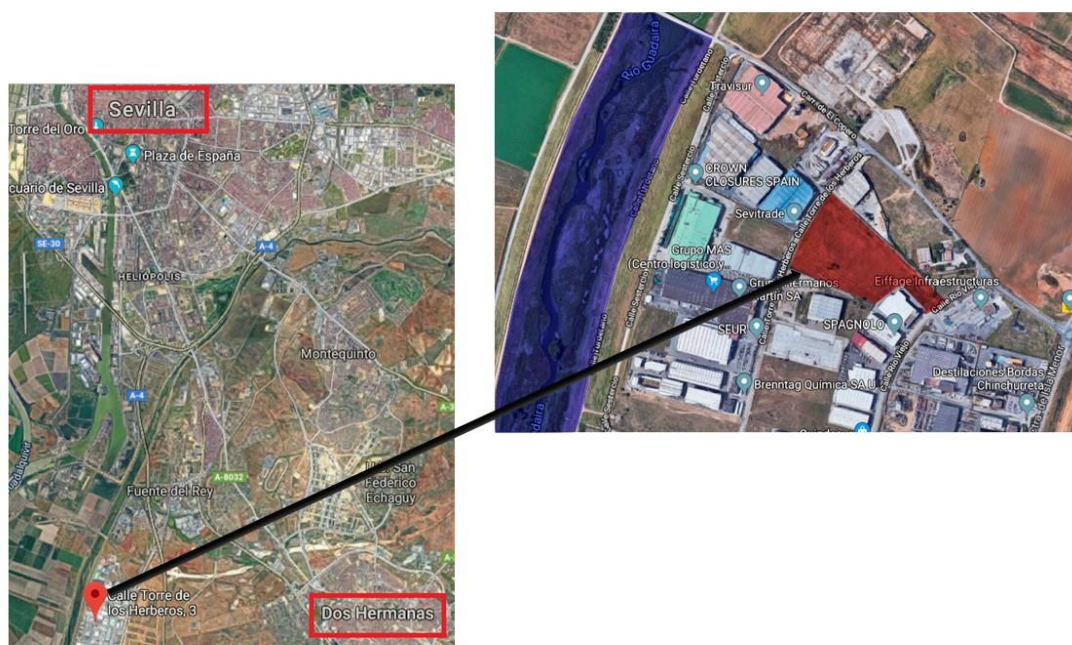


Figura 19: Emplazamiento del terreno en calle Torre de los Hebreros, número 3.

7.2 Implantación

Para la implantación y distribución en planta, Plano III del Bloque III, se ha tenido en cuenta 6 zonas diferenciadas.

1. Zona de entrada y salida de camiones y vehículos lo suficientemente espacioso para que los camiones eviten dar la vuelta o tener que hacer maniobras. Las zonas de carga de productos terminados y descarga de la pieza que se ha de tratar se encuentra de tal manera que los camiones tengan que pasar el menor tiempo posible en la planta. Para facilitar el flujo de camiones, la recogida de fangos, tratandos fuera de

la planta, se realiza por una nueva entrada/salida de camiones colocada en uno de los laterales del terreno.

2. Zona de proceso: Se encuentra en el único edificio de la planta; éste se divide en dos partes; la zona de personal, donde se encuentra la recepción, las diferentes oficinas destinadas a la gestión de la planta, los laboratorios, vestuarios y aseos, y entrada a la planta de procesos. Y la zona de proceso, donde se realizan los tratamientos superficiales de las piezas, esta zona consta de 13 baños, un lugar para la llegada de las piezas que se deben tratar en la planta, y uno para las piezas ya tratadas y su posterior recogida. La zona de proceso dispone de dos puertas traseras que la comunican con la zona de depuración de las aguas.
3. Zona depuración de aguas residuales: Se ha situado en el lateral de la zona de proceso con el objetivo de que las aguas contaminadas puedan pasar a la zona de depuración de una manera fácil. Esta zona se compone de cada uno de los equipos que intervienen para la depuración de las aguas. Una vez depuradas son recirculadas de nuevo a la planta, por ello el secador se encuentra cerca de la parte de proceso, para evitar largos tramos de conductos o tuberías. Se ha considerado que esta zona no estará dentro de ningún edificio, pero sí con una cubierta para proteger la línea de depuración de las posibles condiciones climáticas. El almacenamiento de fango se encuentra fuera de esta cubierta.
4. Zona de almacenamiento de fangos: Se encontraría fuera de la zona de proceso y de depuración. En este caso no se ha considerado ningún tipo de cubierta. Además, cuenta con un acceso individual para la recogida de los lodos con el fin de no tener que cruzar el resto de la planta.
5. Zona de ampliación: cuenta con unas zonas distribuidas a lo largo del solar sin construir para posibles ampliaciones.
6. Zona de personal: además de la zona incluida en el edificio de proceso, se dispone de una zona de aparcamiento para vehículos personales y descanso.

La sala de control se debe construir en un lugar que permita a los operadores parar la unidad en caso de emergencia y que no esté expuesta a incendio y explosión [48].

En el Plano IV del Bloque III, se muestra la implantación con el terreno y los edificios principales acotados.

8. PLANIFICACIÓN DE LAS TAREAS DE EJECUCIÓN

El objetivo de este apartado es establecer los plazos de ejecución del proyecto. Se hace una breve introducción de las diferentes actividades del proceso, su duración y las suposiciones que se han tenido en cuenta y se ilustra a raíz de un diagrama de Gantt en el cual se refleja la duración total del proyecto, así como el camino crítico, es decir la ruta que marca la duración de éste [49].

El proceso tiene un total de 25 actividades que se divide en cinco etapas: la primera etapa en la que se suministra el agente reductor a las aguas de carácter ácidos, la segunda se trata de la dosificación de hipoclorito a las aguas alcalinas, en la tercera etapa se ajusta el pH, la cuarta etapa engloba el clarificador secundario y en la quinta etapa se instala el secador; se tiene en cuenta los equipos eléctricos, como son los transmisores y el cableado y conexión. En todo el proceso se tiene un seguimiento de la medida correctoras, gestión de residuos y seguridad y salud. En la Tabla 13, resumen cada una de las actividades que se realiza en estas etapas y su duración.

Tabla 13: Actividades y duración que se llevan a cabo en el proyecto.

Nº	Nombre	Duración
Actividad		
<i>Etapas 1: Dosificación del Agente Reductor</i>		
1	Obra civil Tanque 101	11 días
2	Transporte del Agente Reductor	4 días
3	Llenado del Tanque 101	3 días.
4	Obra civil Tanque 102	11 días
5	Obra civil Tanque 103	11 días
<i>Etapas 2: Dosificación de Hipoclorito</i>		
6	Obra civil Tanque 104	11 días
7	Transporte de Hipoclorito de Sodio	3 días
8	Llenado Tanque 104	2 días
9	Obra civil Tanque 105	11 días
10	Obra civil Tanque 106	11 día

<i>Etapa 3: Ajuste del pH</i>		
11	Obra civil Tanque 107	11 días
12	Obra civil Tanque 108	11 días
13	Obra civil Tanque de Mezcla 109	11 días
14	Llenado de Tanque de Mezcla	2 días
15	Transporte Cal	1 días
16	Transporte NaOH	3 días
<i>Etapa 4. Clarificador Secundario</i>		
17	Obra civil clarificador	28 días
18	Transporte Coagulante	2 días
19	Transporte Floculante	2 días
<i>Otros</i>		
20	Conexión y conexión	27 días
21	Equipos eléctricos	9 días
22	Medidas correctoras y seguimiento ambiental	77 días
23	Gestión de residuos	77 días
24	Seguridad y Salud	77 días
25	Puesta en Marcha de la planta	15 días

Se tiene en cuenta a la hora de hacer la planificación de ejecución los siguientes aspectos:

- La demanda de materia prima y su correspondiente transporte a la planta ocurre desde el día que se inicia el proyecto.
- Los tanques son llenados tras la construcción.
- Comienza la construcción de un tanque y se supone que a los 7 días ya se comienza con la construcción del siguiente.
- Los tanques de almacenamiento y tanques de reserva se introducen en las etapas de las aguas que les corresponden.

- Tras la construcción de la planta, comienza la automatización y el control, por ello, se implementan el cableado y la conexión y los equipos eléctricos. Los equipos eléctricos comienzan a instalarse a mitad del cableado.
- Una vez, terminada la construcción e instalación de la planta, se inicia la puesta en marcha, la cual se estima su duración de 15 días.

Teniendo en cuenta todas las tareas y los aspectos comentados anteriormente, se obtiene que para la realización del proceso es necesario un total de 92 días (aproximadamente 3 meses). Además, se prevé que empiece el día 2 de septiembre del 2019, para evitar el cierre por vacaciones, por lo que finalizaría su última tarea el 7 de diciembre de 2019.

Para finalizar con la planificación del proyecto se incluye el Diagrama de Gantt, ver Figura 20, en él se muestra que las etapas de mayor duración es la obra civil del clarificador y la puesta en marcha de la planta al final de su construcción.

REFERENCIAS

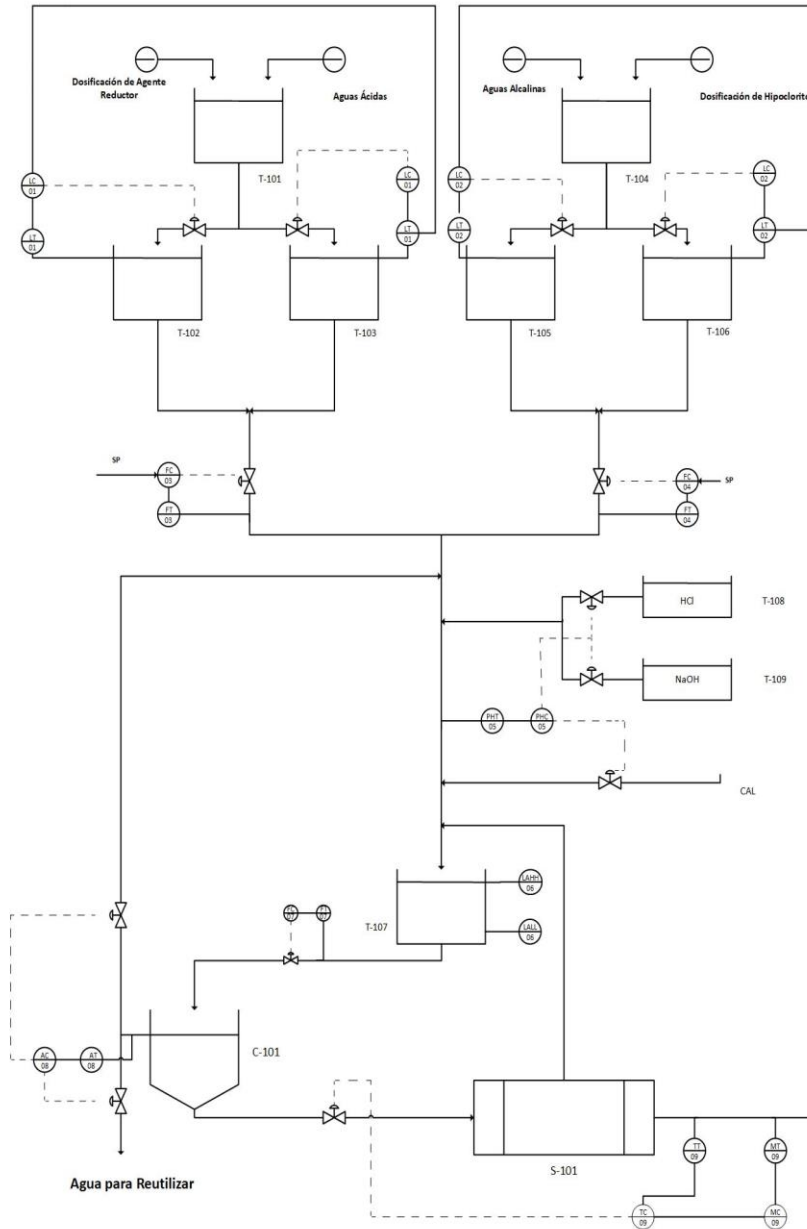
- [1] Estrategia Española de Economía Circular. Secretaria de Estado Ambiente. Dirección General de Calidad y Evaluación Ambiental y Medio Natural. Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente. Gobierno España. Abril 2018. https://www.navarra.es/NR/rdonlyres/8CC787B5-044E-4923-981C-D58521C8FEA3/413997/EstrategiaEspanolaEcCircular_MAPAMA.pdf
(Último acceso: 09/06/2019)
- [2] Guía de Mejores Técnicas Disponibles (MTD) en España del Sector de Tratamiento de Superficies Metálicas y Plásticas. Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino. Gobierno de España. (2009) <http://prtr-es.es/Data/images/MTD-SUPERFICIES-METALICAS.pdf>. (Último acceso: 09/06/2019)
- [3] Reingeniería de una planta de tratamientos superficiales para piezas mecanizadas de aluminio y acero. Capítulo 2. Proyecto Fin de Carrera. Agustín Sánchez Jiménez.2004. Escuela superior de ingeriros industriales. Universidad de Sevilla.
- [4] Recytrans-Soluciones globales para el reciclaje. (2015). <https://www.recytrans.com/blog/aguas-industriales/> (Último acceso: 09/06/2019)
- [5] España, P. R. T. R. (2017). Registro Estatal de Emisiones y Fuentes Contaminantes. <http://www.prtr-es.es/informes/industrialactivitypollutant.aspx> (Último acceso: 09/06/2019)
- [6] Boletín Oficial de la Junta de Andalucía (BOJA). (2015) Núm.89 página 22 Anexo VI https://www.juntadeandalucia.es/boja/2015/89/BOJA15-089-00174-7748-01_00068899.pdf (Último acceso: 09/06/2019)
- [7] Ecured- Hidróxido de Sodio. https://www.ecured.cu/Hidr%C3%B3xido_de_Sodio (Último acceso: 09/06/2019)
- [8] Hoja de datos de seguridad para materiales peligrosos. Hidróxido de sodio. Mexichem (2010) [http://www.aniq.org.mx/pqta/pdf/Sosa%20Caustica%20estandar%20\(MSDS\).pdf](http://www.aniq.org.mx/pqta/pdf/Sosa%20Caustica%20estandar%20(MSDS).pdf) (Último acceso: 09/06/2019)
- [9] Lenntech. Propiedades químicas del Cromo- Efectos del Cromo sobre la salud- Efectos ambientales del romo. (1998-2019) <https://www.lenntech.es/periodica/elementos/cr.htm> (Último acceso: 09/06/2019)
- [10] Cromo- Wikipedia – La enciclopedia libre. (2019)<https://es.wikipedia.org/wiki/Cromo> (Último acceso: 09/06/2019)
- [11] Procesamiento de Superficies. (2016-2017) Alicia Ronda Gálvez. Departamento Ingeniería Mecánica y Fabricación Universidad de Sevilla.
- [12] Desengrase por vapor. Desengrase de superficies metálicas. Instituto Nacional de Seguridad, salud y Bienestar en el Trabajo (INSSBT). Ministerio de Empleo y Seguridad Social. Gobierno de España..

- <http://desengrase.inssbt.es/procesos/desengrase-por-vapor.html>. Último acceso: 09/06/2019)
- [13] Alternativas de prevención de la contaminación en el sector de Tratamientos de superficies. Centro de Actividad Regional para la Producción Limpia (CAR/PL). Plan de Acción para el Mediterraneo. (2002)
- [14] Inmersión. Desengrase de superficies metálicas. Instituto Nacional de Seguridad, salud y Bienestar en el Trabajo (INSSBT). Ministerio de Empleo y Seguridad Social. Gobierno de España <http://desengrase.inssbt.es/procesos/inmersion.html>. Último acceso: 09/06/2019)
- [15] Procesos de desengrase de superficies metálicas. Desengrase de superficies metálicas. Instituto Nacional de Seguridad, salud y Bienestar en el Trabajo (INSSBT). Ministerio de Empleo y Seguridad Social. Gobierno de España <http://desengrase.inssbt.es/procesos/procesos.html>. (Último acceso: 09/06/2019)
- [16] Decapado de Metales. Temples Industriales Alcalá, S.L <https://www.templesindustrialesalcala.es/decapado-metales/>. (Último acceso: 09/06/2019)
- [17] Residuos de Tratamientos Superficiales y mecanizado de piezas. Capítulo 17. Junta de Andalucía.
- [18] Recubrimiento orgánico. Bryan Rodríguez. Máximo Pérez. Universidad Fermín Toro. Vicerectorado académico. Facultad de Ingeniería Cadure. <https://es.slideshare.net/bryandavid24/recubrimiento-organico>
- [19] Recubrimiento metálico. <https://es.scribd.com/document/347265910/Recubrimientos-metalicos>. (Último acceso: 09/06/2019)
- [20] Fosfatado de metales. Quivacolor. <https://quivacolor.com/fosfatado-de-metales/>. (Último acceso: 09/06/2019)
- [21] Chromate coatings. Zaki Ahmad, Principles of Corrosion Engineering and Corrosion Control. (2006) <https://www.sciencedirect.com/topics/materials-science/chromate-coatings>. (Último acceso: 09/06/2019)
- [22] Delstar. Metal Finishing, Inc. <https://www.delstar.com/passivating> (Último acceso: 09/06/2019)
- [23] Thiago Ferrer Morini. Viento en las alas de la aeronáutica española. Periódico el País. Madrid (2016) https://elpais.com/economia/2016/08/26/actualidad/1472199608_155623.html. (Último acceso: 09/06/2019)
- [24] Real Decreto 606/2003. Boletín Oficial del Estado (BOE). Núm 135. (2003). <https://www.boe.es/boe/dias/2003/06/06/pdfs/A22071-22096.pdf>. (Último acceso: 09/06/2019)
- [25] Crew. El crecimiento del sector aeronáutico. <https://www.crewschool.es/crecimiento-del-sector-aeronautico/> (Último acceso: 09/06/2019)
- [26] Diseño de instalaciones para anodizado tartárico de piezas de aleación de aluminio. Proyecto Fin de Carrera. Universidad de Cádiz.
- [27] Ficha de datos de seguridad TURCO 4215NC-LT. Henkel (2018) <https://pim.henkelgroup.net/henkel/msdspdf?country=US&language=ES&matnr=598338>

- [28] Material Safety Data Sheet. Turco Aluminetch 2. Section 2- Composition/Information on Ingredients. (2007)
<http://www.metalcraft.net/MSDS/BLDG%20%20PLATING/TURCO%20ALUMINETCH%20.pdf>
- [29] Ficha de datos de seguridad TURCO 4215NC-LT. Henkel (2018)
<https://pim.henkelgroup.net/henkel/msdspdf?country=US&language=ES&matnr=597091>
- [30] El anodizado del aluminio. Asociación Española del Aluminio y Tratamientos de Superficie (AEA). (2014). https://www.youtube.com/watch?v=Oy_hsaq_ZvU. (Último acceso: 09/06/2019)
- [31] APMEN. Asociación APMEN, metales de Navarra. (Último acceso: 19/06/2019)
<http://asociacionmetal.com/factores-riesgo-sector-del-metal-tratamientos-superficiales>
- [32] (Farr, Smith, Steichen, 2000) Farr, J. P.; Smith, W. L.; Steichen, D. S. 'Bleaching Agents, Survey'. Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology. John Wiley & Sons, 1996. (Article online posting date December 4, 2000).
- [33] Apuntes de asignatura de Diseño de Tratamiento de Aguas (2019). Máster Universitario de Ingeniería Química. Departamento Ingeniería Química y Ambiental. Universidad de Sevilla.
- [34] Práctica de asignatura de Diseño de Tratamiento de Aguas (2019). Máster Universitario de Ingeniería Química. Departamento Ingeniería Química y Ambiental. Universidad de Sevilla.
- [35] Harriott, P., McCabe, W. L., & Smith, J. C. Sexta Edición. *Operaciones unitarias en ingeniería química*.
- [36] Ingeniería de aguas residuales/Tratamientos Físico-químico. Wikilibros
https://es.wikibooks.org/wiki/Ingenier%C3%ADa_de_aguas_residuales/Tratamiento_f%C3%ADsico-qu%C3%ADmico#6.2._Polielectrolitos.
- [37] Coagulantes y floculantes naturales usados en la reducción de turbidez, sólidos suspendidos, colorantes y metales pesados en aguas residuales. Monica Alejandra Bravo Gallardo. Bogotá (2017)
<http://repository.udistrital.edu.co/bitstream/11349/5609/1/BravoGallardoMonicaAlejandra2017.pdf>
(Último acceso: 09/06/2019)
- [38] J.S. Navarro Reyes. Efecto de la forma y otros factores en la velocidad de sedimentación de partículas. Universidad Nacional de Colombia.
https://www.academia.edu/6683881/Velocidad_de_sedimentacion_de_particulas (Último acceso: 09/06/2019)
- [39] FísicaPractica. <https://www.fisicapractica.com/numero-de-reynolds.php> (Último acceso: 09/06/2019)
- [40] GK-FLOC POL: Polielectrolito floculante para aguas residuales. Global Kliner.
<http://www.klinerprofesional.com/wp-content/uploads/2016/03/GK-FLOC%20POL.pdf> (Último acceso: 09/06/2019)
- [41] Raúl Fernández. Sedimentación/Aguas. Escuela de Organización Industrial (2015/2016) (Último acceso: 09/06/2019)
- [42] Apuntes de asignatura de Tratamiento de Aguas (2017). Grado en Ingeniería Química. Departamento Ingeniería Química y Ambiental. Universidad de Sevilla.

- [43] Tablas de Propiedades del agua saturada (líquido-vapor): Tabla de presiones. Anexo I. <http://biblioteca.uns.edu.pe/saladocentes/archivoz/curzoz/tablas001.pdf>. (Último acceso: 09/06/2019)
- [44] Real Decreto 952/1997. Boletín Oficial del Estado (BOE) Núm160 (1997). <https://www.boe.es/eli/es/rd/1997/06/20/952/dof/spa/pdf> (Último acceso: 19/06/2019)
- [45] Disposición General 403. Boletín Oficial del Estado (BOE). Núm 12. (2017). <HTTPS://WWW.BOE.ES/BOE/DIAS/2017/01/14/PDFS/BOE-A-2017-403.PDF> (Último acceso: 19/06/2019)
- [46] Climate-data.org (2019) <https://es.climate-data.org/europe/espana/andalucia/sevilla-2933/> (Último acceso: 09/06/2019)
- [47] Tiempo Sevilla.es (2019)<http://www.tiempoensevilla.es/wxwinddetail.php?> (Último acceso: 09/06/2019)
- [48] Apuntes de asignatura de Ingeniería Plantas Químicas (2018). Grado en Ingeniería Química. Departamento Ingeniería Química y Ambiental. Universidad de Sevilla.
- [49] Sinnaps. <https://www.sinnaps.com/blog-gestion-proyectos/camino-critico-proyecto> (Último acceso: 09/06/2019)

III.PLANOS

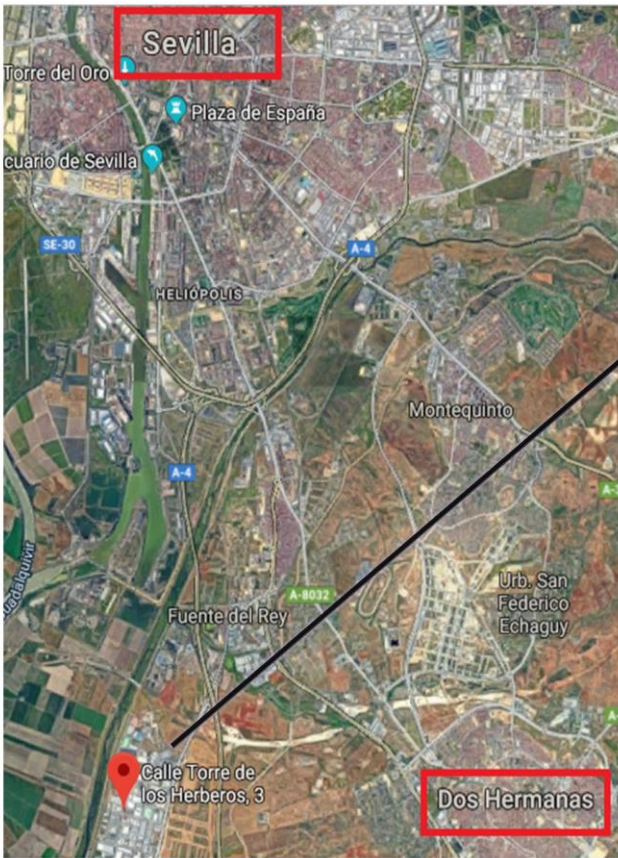




Nomenclatura	Significado
T-101	Tanque de Agua Ácidas
T-102	Tanque de reserva Aguas Ácidas
T-103	Tanque 2 Aguas Ácidas
T-104	Tanque Aguas Ácidas
T-105	Tanque 2 Aguas Alcalinas
T-106	Tanque reserva Agua Alcalinas
T-107	Tanque Aguas Mezclas
T-108	Tanque Ácido Clorhídrico
T-109	Tanque 2 Hidróxido de Sodio
C-101	Clarificador
S-101	Secador

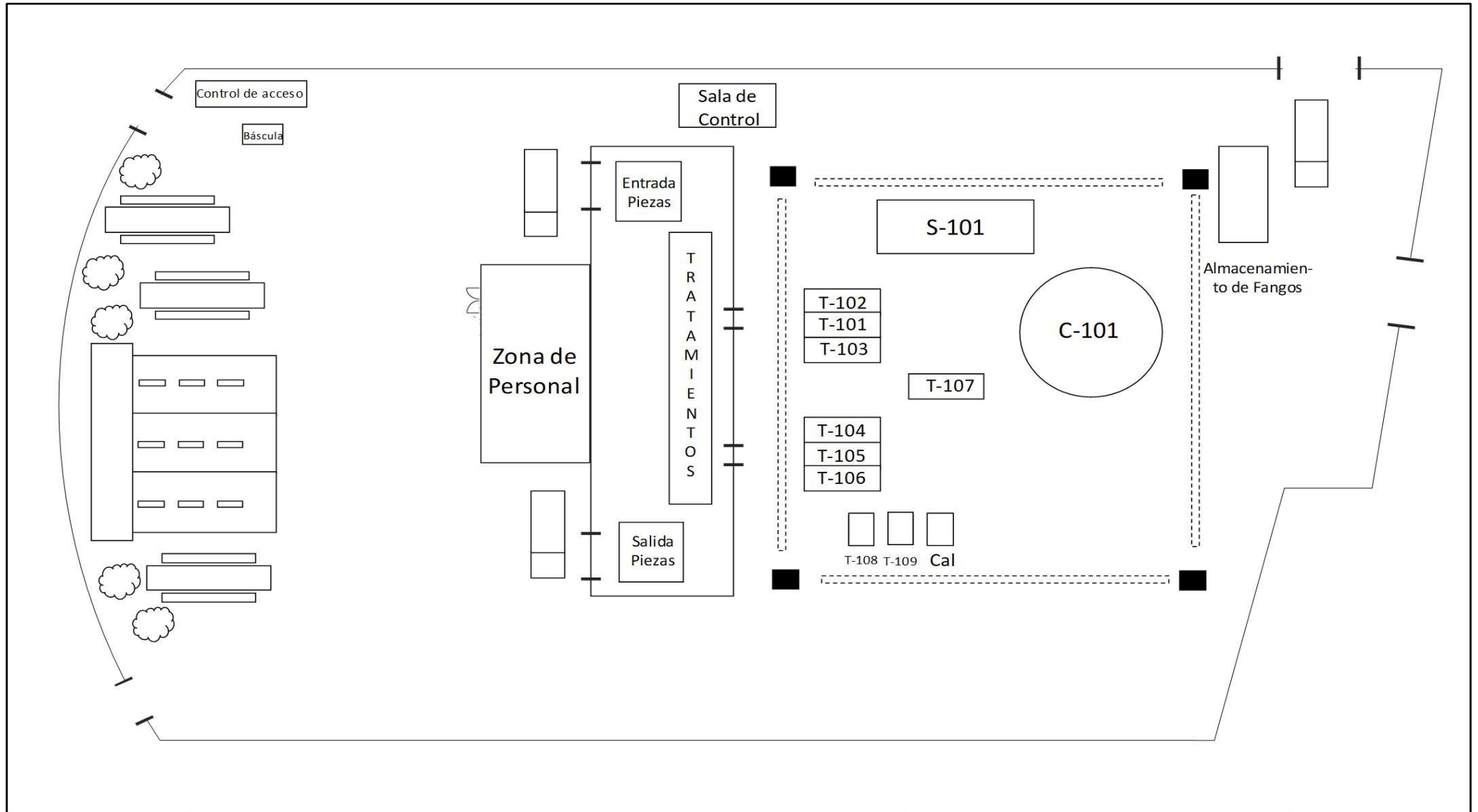
Nomenclatura	Significado
⊖	El instrumento se encuentra ubicación en una localización principal accesible al operario.
LT	Transmisor de Nivel
LC	Controlador de Nivel
FT	Transmisor de Caudal
FC	Controlador de Caudal
PHT	Transmisor de PH
PHC	Controlador de pH
LAHH	Alarma Muy Alto Nivel
LALL	Alarma Muy Bajo Nivel
AT	Transmisor de Calidad
AC	Controlador de Calidad
TT	Transmisor de Temperatura
TC	Controlador de Temperatura
MT	Transmisor de Humedad
MC	Controlador de Humedad



	Nombre del plano: Plano I: Diagrama de instrumentación de la planta depuradora de agua.	Fecha: 19/06/2019	
	Autor: Ana Pérez García	Escala: -	

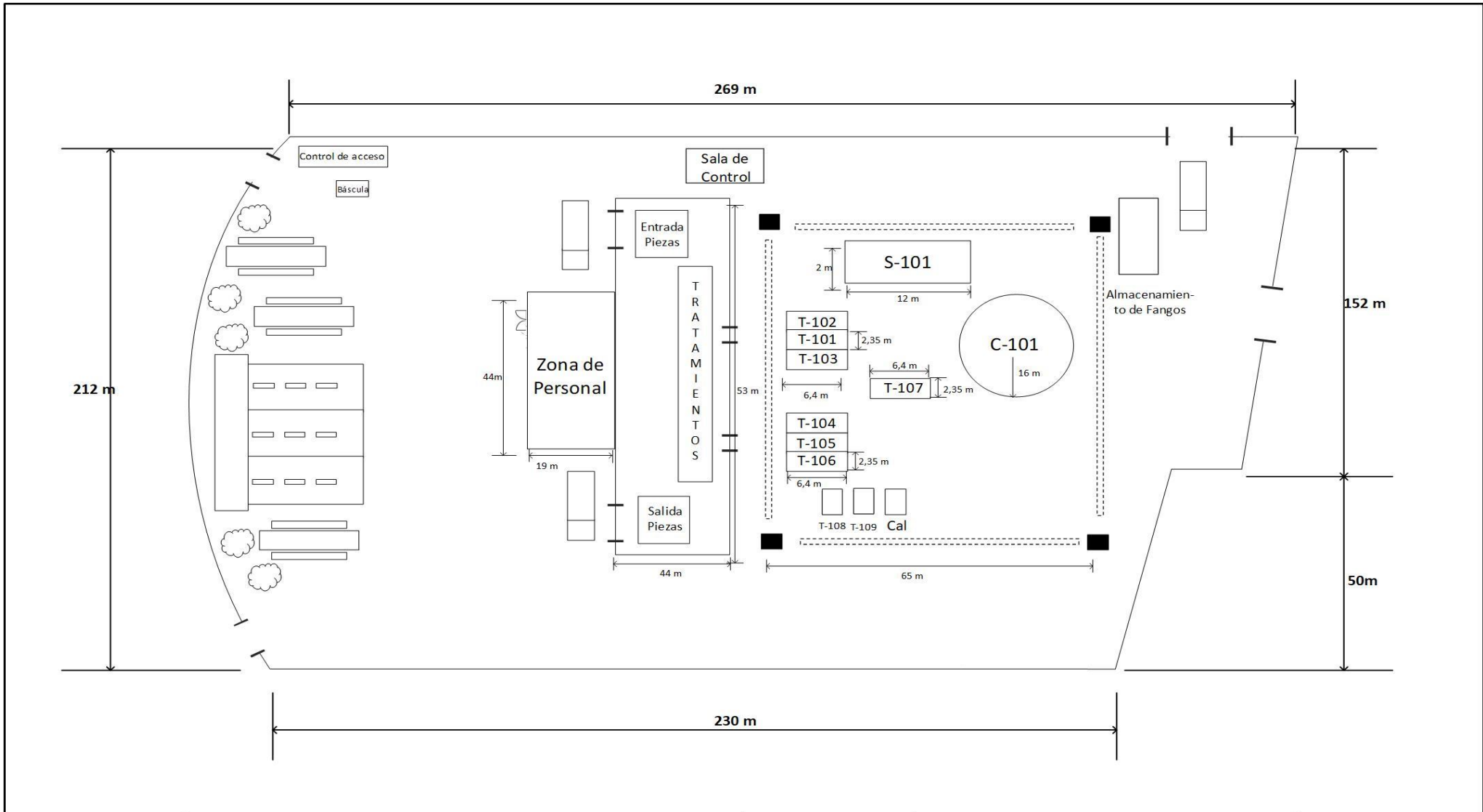
LC





	Nombre del plano: Plano II: Localización y emplazamiento. Calle Torre de los Hebreros. nº 3.	Fecha: 19/06/2019	
	Autor: Ana Pérez García	Escala: -	



	Nombre del plano: Plano III: Implantación y distribución de las diferentes zonas en la planta.	Fecha: 19/06/2019	
	Autor: Ana Pérez García	Escala: -	



	Nombre del plano: Plano IV: Implantación y distribución de las diferentes zonas en la planta acotadas.	Fecha: 19/06/2019	
	Autor: Ana Pérez García	Escala: -	

ANEXO I. TABLAS PROPIEDADES DEL AGUA

A continuación, se muestra la Tabla X1 empleada para determinar el flujo de aire que se necesita en el secador, en concreto para obtener el calor de vaporización del agua a 1 bar. Y la Tabla X2 y X3 que muestran los calores específicos del agua y del aire respectivamente.

Tabla X1: Propiedades del agua saturada (líquido-vapor): Tabla de presiones [43].

Presión bar	Temp. °C	Volumen específico m ³ /kg		Energía interna kJ/kg		Entalpía kJ/kg			Entropía kJ/kg · K		Presión bar
		Líquido sat. $v_f \times 10^3$	Vapor sat. v_g	Líquido sat. u_f	Vapor sat. u_g	Líquido sat. h_f	Vapori- zación h_{fg}	Vapor sat. h_g	Líquido sat. s_f	Vapor sat. s_g	
0.04	28.96	1.0040	34.800	121.45	2415.2	121.46	2432.9	2554.4	0.4226	8.4746	0.04
0.06	36.16	1.0064	23.739	151.53	2425.0	151.53	2415.9	2567.4	0.5210	8.3304	0.06
0.08	41.51	1.0084	18.103	173.87	2432.2	173.88	2403.1	2577.0	0.5926	8.2287	0.08
0.10	45.81	1.0102	14.674	191.82	2437.9	191.83	2392.8	2584.7	0.6493	8.1502	0.10
0.20	60.06	1.0172	7.649	251.38	2456.7	251.40	2358.3	2609.7	0.8320	7.9085	0.20
0.30	69.10	1.0223	5.229	289.20	2468.4	289.23	2336.1	2625.3	0.9439	7.7686	0.30
0.40	75.87	1.0265	3.993	317.53	2477.0	317.58	2319.2	2636.8	1.0259	7.6700	0.40
0.50	81.33	1.0300	3.240	340.44	2483.9	340.49	2305.4	2645.9	1.0910	7.5939	0.50
0.60	85.94	1.0331	2.732	359.79	2489.6	359.86	2293.6	2653.5	1.1453	7.5320	0.60
0.70	89.95	1.0360	2.365	376.63	2494.5	376.70	2283.3	2660.0	1.1919	7.4797	0.70
0.80	93.50	1.0380	2.087	391.58	2498.8	391.66	2274.1	2665.8	1.2329	7.4346	0.80
0.90	96.71	1.0410	1.869	405.06	2502.6	405.15	2265.7	2670.9	1.2695	7.3949	0.90
1.00	99.63	1.0432	1.694	417.36	2506.1	417.46	2258.0	2675.5	1.3026	7.3594	1.00
1.50	111.4	1.0528	1.159	466.94	2519.7	467.11	2226.5	2693.6	1.4336	7.2233	1.50
2.00	120.2	1.0605	0.8857	504.49	2529.5	504.70	2201.9	2706.7	1.5301	7.1271	2.00
2.50	127.4	1.0672	0.7187	535.10	2537.2	535.37	2181.5	2716.9	1.6072	7.0527	2.50
3.00	133.6	1.0732	0.6058	561.15	2543.6	561.47	2163.8	2725.3	1.6718	6.9919	3.00
3.50	138.9	1.0786	0.5243	583.95	2546.9	584.33	2148.1	2732.4	1.7275	6.9405	3.50
4.00	143.6	1.0836	0.4625	604.31	2553.6	604.74	2133.8	2738.6	1.7766	6.8959	4.00
4.50	147.9	1.0882	0.4140	622.25	2557.6	623.25	2120.7	2743.9	1.8207	6.8565	4.50
5.00	151.9	1.0926	0.3749	639.68	2561.2	640.23	2108.5	2748.7	1.8607	6.8212	5.00
6.00	158.9	1.1006	0.3157	669.90	2567.4	670.56	2086.3	2756.8	1.9312	6.7600	6.00
7.00	165.0	1.1080	0.2729	696.44	2572.5	697.22	2066.3	2763.5	1.9922	6.7080	7.00
8.00	170.4	1.1148	0.2404	720.22	2576.8	721.11	2048.0	2769.1	2.0462	6.6628	8.00
9.00	175.4	1.1212	0.2150	741.83	2580.5	742.83	2031.1	2773.9	2.0946	6.6226	9.00
10.0	179.9	1.1273	0.1944	761.68	2583.6	762.81	2015.3	2778.1	2.1387	6.5863	10.0
15.0	198.3	1.1539	0.1318	843.16	2594.5	844.84	1947.3	2792.2	2.3150	6.4448	15.0
20.0	212.4	1.1767	0.09963	906.44	2600.3	908.79	1890.7	2799.5	2.4474	6.3409	20.0
25.0	224.0	1.1973	0.07998	959.11	2603.1	962.11	1841.0	2803.1	2.5547	6.2575	25.0
30.0	233.9	1.2165	0.06668	1004.8	2604.1	1008.4	1795.7	2804.2	2.6457	6.1869	30.0
35.0	242.6	1.2347	0.05707	1045.4	2603.7	1049.8	1753.7	2803.4	2.7253	6.1253	35.0
40.0	250.4	1.2522	0.04978	1082.3	2602.3	1087.3	1714.1	2801.4	2.7964	6.0701	40.0
45.0	257.5	1.2692	0.04406	1116.2	2600.1	1121.9	1676.4	2798.3	2.8610	6.0199	45.0
50.0	264.0	1.2859	0.03944	1147.8	2597.1	1154.2	1640.1	2794.3	2.9202	5.9734	50.0
60.0	275.6	1.3187	0.03244	1205.4	2589.7	1213.4	1571.0	2784.3	3.0267	5.8892	60.0
70.0	285.9	1.3513	0.02737	1257.6	2580.5	1267.0	1505.1	2772.1	3.1211	5.8133	70.0
80.0	295.1	1.3842	0.02352	1305.6	2569.8	1316.6	1441.3	2758.0	3.2068	5.7432	80.0
90.0	303.4	1.4178	0.02048	1350.5	2557.8	1363.3	1378.9	2742.1	3.2858	5.6772	90.0
100.	311.1	1.4524	0.01803	1393.0	2544.4	1407.6	1317.1	2724.7	3.3596	5.6141	100.
110.	318.2	1.4886	0.01599	1433.7	2529.8	1450.1	1255.5	2705.6	3.4295	5.5527	110.

* Nota: Adviértase que el punto (.) separa la parte entera de la decimal.

Tabla X2: Calores específicos de diversos líquidos y sólidos [42].

A. Líquidos	Estado	c (kJ/kg · K)
Agua	1 atm, 0°C	4.217
	1 atm, 27°C	4.179
	1 atm, 100°C	4.218
Amoníaco	líq. sat., -20°C	4.52
	líq. sat., 10°C	4.67
	líq. sat., 50°C	5.10
Etanol	1 atm, 25°C	2.43
Glicerina	1 atm, 10°C	2.32
	1 atm, 50°C	2.58
Mercurio	1 atm, 10°C	0.138
	1 atm, 315°C	0.134
Refrigerate 12	líq. sat., -20°C	0.90
	líq. sat., 20°C	0.96
B. Sólidos	Temperatura (K)	c (kJ/kg · K)
Aluminio	300	0.903
Cobre	300	0.385
	400	0.393
Hierro	200	1.56
	240	1.86
	273	2.11
Hierro	300	0.447
Plata	300	0.235
Plomo	300	0.129

Tabla X3: Calores específicos para gas ideal en el aire, nitrógeno y oxígeno [42].

Temp. K	c_p	c_v	k	c_p	c_v	k	c_p	c_v	k	Temp. K
	Aire			Nitrógeno, N ₂			Oxígeno, O ₂			
250	1.003	0.716	1.401	1.039	0.742	1.400	0.913	0.653	1.398	250
300	1.005	0.718	1.400	1.039	0.743	1.400	0.918	0.658	1.395	300
350	1.008	0.721	1.398	1.041	0.744	1.399	0.928	0.668	1.389	350
400	1.013	0.726	1.395	1.044	0.747	1.397	0.941	0.681	1.382	400
450	1.020	0.733	1.391	1.049	0.752	1.395	0.956	0.696	1.373	450
500	1.029	0.742	1.387	1.056	0.759	1.391	0.972	0.712	1.365	500
550	1.040	0.753	1.381	1.065	0.768	1.387	0.988	0.728	1.358	550
600	1.051	0.764	1.376	1.075	0.778	1.382	1.003	0.743	1.350	600
650	1.063	0.776	1.370	1.086	0.789	1.376	1.017	0.758	1.343	650
700	1.075	0.788	1.364	1.098	0.801	1.371	1.031	0.771	1.337	700
750	1.087	0.800	1.359	1.110	0.813	1.365	1.043	0.783	1.332	750
800	1.099	0.812	1.354	1.121	0.825	1.360	1.054	0.794	1.327	800
900	1.121	0.834	1.344	1.145	0.849	1.349	1.074	0.814	1.319	900
1000	1.142	0.855	1.336	1.167	0.870	1.341	1.090	0.830	1.313	1000

ANEXO II. BALANCE DE MATERIA

En este segundo Anexo, se adjunta un balance de materia por componente de la planta; reflejado en la Tabla Y1 y Tabla Y2. La planta dispone de 24 líneas de corrientes: de las cuales las corrientes de entradas son la corrientes 1,2,9 y 10 y las corrientes de salidas la 21, el agua a reutilizar en la planta y la corriente 24 de lodos.

Tabla Y1: Balance de materia de la planta depuradora de agua de la corriente 1 hasta la 12.

N° Líneas	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Compuesto (mol/h)												
Cr(VI)	0	770,1	0,00019	0,00019	0,00019	0,00019	0,00019	0,00019	0	0	0	0
Cr(III)	0	0	770,1	770,1	770,1	770,1	770,1	770,1	0	0	0	0
NaHSO ₃	1155,14	0	1155,14	1155,14	1155,14	1155,14	1155,14	1155,14	0	0	0	0
NaOH	0	0	0	0	0	0	0	0	2232,5	0	2232,5	2232,5
NaClO	0	0	0	0	0	0	0	0	0	84400	84400	84400
FeCl ₃	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Polielectrolito	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
H ₂ O	0	2777,78	2777,78	2777,78	2777,78	2777,78	2777,78	2777,78	2777,78	0	2777,78	2777,78
H ₂ O (Humedad)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
F total (kmol/h)	1,16	3,55	4,703	4,703	4,703	4,703	4,703	4,703	5,01	84,4	89,41	89,41

Tabla Y2: Balance de materia de la planta depuradora de agua de la corriente 13 hasta la 24.

Nº Líneas	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Compuesto (mol/h)												
Cr(VI)	0	0	0	0	0,00019	0,00019	0,00019	0	0,00019	0	0	0
Cr(III)	0	0	0	0	770,1	770,1	770,1	0	0	770,1	0	770,1
NaHSO ₃	0	0	0	0	1155,14	1155,14	1155,14	0	0	1155,14	0	1155,14
NaOH	2232,5	2232,5	2232,5	2232,5	2232,5	2232,5	2232,5	0	0	2232,5	0	2232,5
NaClO	84400	84400	84400	84400	84400	84400	84400	0	0	84400	0	84400
FeCl ₃	0	0	0	0	0	0	0	0	0	233046	0	233046
Polielectrolito	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1291,58	0	1291,58
H ₂ O	2777,78	2777,78	2777,78	2777,78	5555,6	5555,6	5555,6	0	4295,56	0	0	-
H ₂ O (Humedad)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1260	0
F total (kmol/h)	89,41	89,41	89,41	89,41	94,11	94,11	94,11	0	4,3	322,9	0	332,9

Para el Balance de Materia por componente de la planta se ha tenido en cuenta las siguientes suposiciones:

- La válvula de la corriente de recirculación, (línea 20), permanece cerrada.
- Los tanques de reserva tienen la misma concentración; cuando uno trabaja el otro permanece vacío.
- El caudal de agua en el clarificador es de 1000 l/h (BC); se divide por partes iguales entre aguas ácidas y alcalinas.
- La cantidad adicción de HCl, NaOH y cal para ajustar el pH no se tiene encuentra entre las líneas 17 y 18; así que se supone que ambas corrientes son iguales.
- Todas las corrientes tienen la misma calidad de agua, solo te fija los moles/horas.

