



**UNIVERSITAT
JAUME·I**

**ESCUELA SUPERIOR DE TECNOLOGÍA Y CIENCIAS
EXPERIMENTALES DE LA UNIVERSIDAD JAUME I**

Grado en Ingeniería Química

TRABAJO DE FIN DE GRADO

**Diseño de un tratamiento terciario
especializado en la eliminación de boro de
aguas residuales de procedencia industrial
cerámica**



Alumno: Bonete Encinas, Sergio

Tutor: Monfort Gimeno, Eliseo

Supervisora de prácticas: Andreu Gallego, Alicia

RESUMEN:

En este proyecto se diseña y evalúa la viabilidad de un tratamiento terciario basado en el uso de carbón activo impregnado para la depuración de boro en aguas residuales industriales como alternativa a los sistemas tradicionalmente propuestos (ósmosis inversa e intercambio iónico), pero con escasa implantación industrial debido a su elevado coste. El caso estudiado es el de las aguas residuales de una empresa productora de baldosas cerámicas que no dispone de una planta de preparación de materias primas del soporte que le permita reciclar el 100% del agua residual en el propio proceso. La empresa dispone de una planta de tratamiento fisicoquímico de las aguas residuales, pero no puede realizar el vertido de la corriente de excedentes y purga del sistema ($4,4 \text{ m}^3/h$) por incumplir el valor límite de emisión de boro. La gestión actual consiste en transportar el agua residual mediante camiones cuba a la empresa proveedora del granulado atomizado para reutilizarla como agua de molienda, pero dada la distancia entre ambas empresas (39 km) supone un elevado sobre coste. Este proyecto se plantea como una alternativa potencial que permita reducir los costes de gestión y la reutilización de las aguas residuales como aguas de riego en el sector agrícola. En el tratamiento terciario propuesto, la operación clave para reducir el contenido en boro consiste en una etapa de adsorción con carbón activo impregnado, además también se incluyen otras operaciones complementarias para ajustar los parámetros del agua.

En los presentes documentos se resume la información recabada en una exhaustiva búsqueda bibliográfica para hallar la forma óptima de llevar a cabo el tratamiento, así como la experimentación realizada en un montaje a escala de laboratorio para evaluar la funcionalidad del tratamiento del boro. Una vez determinados los valores de diseño, las variables de operación y las dimensiones óptimas, se lleva a cabo el diseño del tratamiento terciario a tamaño industrial, evaluando el proyecto desde diversos puntos de vista como el cumplimiento de los valores límite de emisión y la viabilidad económica y técnica. También se incluye una comparación económica entre el sistema actual de transporte con camiones cuba y el tratamiento terciario diseñado.

ÍNDICE:

ÍNDICE DE FIGURAS:	15
ÍNDICE DE TABLAS:	19
SIGLAS Y ACRÓNIMOS:	22
NOMENCLATURA:	24
MEMORIA	29
1. Justificación	33
2. Objetivos	34
2.1. Objetivo general	34
2.2. Objetivos específicos.....	34
3. Alcance	35
4. Planificación de elaboración	35
5. Antecedentes	37
5.1. La industria cerámica.....	37
5.2. Uso del agua en el proceso de fabricación de baldosas cerámicas esmaltadas	41
5.3. Depuración del agua residual en el sector cerámico.....	46
5.3.1. Regulación de la reutilización de aguas depuradas.....	52
5.4. El boro y sus compuestos	56
5.4.1. Distribución del boro en el planeta	56
5.4.2. El boro en medio acuoso.....	57
5.4.3. Efectos en la salud	62
5.4.4. Tecnologías de eliminación del boro	64
5.4.4.1. Ósmosis inversa.....	64
5.4.4.2. Intercambio iónico.....	68
5.4.4.3. Electrodialisis	69
5.5. Adsorción.....	69

5.5.1. Historia.....	71
5.5.2. Dinámica.....	72
5.5.3. Termodinámica y equilibrio.....	78
5.5.4. Cinética.....	89
5.5.5. Adsorbentes.....	95
5.5.5.1. Carbón activo.....	100
5.5.5.2. Adsorción de boro en carbón activo.....	104
5.5.6. Tecnología de las unidades de adsorción.....	109
5.5.6.1. Consideraciones de la mecánica de fluidos en los lechos fijos.....	122
5.5.6.2. Métodos de dimensionado de las unidades de adsorción.....	130
5.5.6.3. Método LUB.....	131
6. Análisis de soluciones.....	141
7. Requisitos de diseño.....	146
8. Descripción del proceso.....	148
9. Maquinaria e instalaciones.....	155
10. Definición de espacios.....	176
11. Distribución de la planta.....	177
12. Ubicación y emplazamiento de la actividad.....	180
13. Resumen del presupuesto de inversión.....	181
14. Presupuesto de explotación.....	182
14.1. Costes directos.....	182
14.1.1. Costes eléctricos.....	182
14.1.2. Coste de reactivos.....	183
14.1.3. Costes de adsorción.....	184
14.2. Costes indirectos.....	185
15. Estudio de viabilidad económica.....	187
16. Planificación de ejecución.....	191
17. Normas y referencias aplicadas.....	192

17.1. Bibliografía.....	192
18. Conclusión.....	196
ANEXOS	199
1. Adjuntos de los antecedentes.....	203
2. Experimentos de adsorción de boro a escala laboratorio	206
3. Cálculos justificativos	210
3.1. Diseño de la operación de filtración con arena.....	210
3.2. Diseño de la operación de adsorción con GAC no impregnado.....	214
3.3. Diseño de la balsa pulmón.....	218
3.4. Diseño del reactor de elevación de <i>pH</i>	220
3.5. Diseño de la operación de adsorción con GAC impregnado.....	224
3.6. Diseño del reactor de disminución del <i>pH</i>	229
3.7. Diseño del reactor de cloración	233
3.8. Diseño del tanque final de almacenamiento	235
3.9. Diseño de las conducciones hidráulicas	237
4. Catálogos comerciales	273
PLANOS.....	281
1. Ubicación de la planta.....	285
2. Diagrama de flujo.....	285
3. Distribución en planta.....	285
PLIEGO DE CONDICIONES.....	287
1) Pliego de condiciones generales, facultativas y económicas	295
1. Disposiciones generales	295
1.1. Disposiciones de carácter general.....	295
1.1.1. Objeto del pliego de condiciones	295
1.1.2. Contrato de obra.....	295

1.1.3. Documentación del contrato de obra	295
1.1.4. Proyecto arquitectónico	295
1.1.5. Reglamentación urbanística	296
1.1.6. Formulación del contrato de obra	296
1.1.7. Jurisdicción competente	297
1.1.8. Responsabilidad del contratista.....	297
1.1.9. Accidentes de trabajo	297
1.1.10. Daños y perjuicios a terceros	297
1.1.11. Anuncios y carteles	298
1.1.12. Copia de documentos	298
1.1.13. Suministro de materiales.....	298
1.1.14. Hallazgos.....	298
1.1.15. Causas de rescisión del contrato de obra	299
1.1.16. Omisiones: Buena fe	299
1.2. Disposiciones relativas a trabajos, materiales y medios auxiliares	300
1.2.1. Accesos y vallados	300
1.2.2. Replanteo	300
1.2.3. Inicio de la obra y ritmo de ejecución de los trabajos.....	300
1.2.4. Orden de los trabajos	301
1.2.5. Facilidades para otros contratistas	301
1.2.6. Ampliación del proyecto por causas imprevistas o de fuerza mayor.....	302
1.2.7. Interpretaciones, aclaraciones y modificaciones del proyecto.....	302
1.2.8. Prorroga por causa de fuerza mayor	302
1.2.9. Responsabilidad de la dirección facultativa en el retraso de la obra	303
1.2.10. Trabajos defectuosos.....	303
1.2.11. Vicios ocultos.....	303
1.2.12. Procedencia de materiales, aparatos y equipos	304
1.2.13. Presentación de muestras	304

1.2.14. Materiales, aparatos y equipos defectuosos	304
1.2.15. Gastos ocasionados por pruebas y ensayos.....	304
1.2.16. Limpieza de las obras.....	305
1.2.17. Obras sin prescripciones explícitas	305
1.3. Disposiciones de las recepciones de edificios y obras anexas.....	305
1.3.1. Consideraciones de carácter general	305
1.3.2. Recepción provisional.....	306
1.3.3. Documentación final de la obra	307
1.3.4. Medición definitiva y liquidación provisional de la obra	307
1.3.5. Plazo de garantía	307
1.3.6. Conservación de las obras recibidas provisionalmente	307
1.3.7. Recepción definitiva	308
1.3.8. Prórroga del plazo de garantía	308
1.3.9. Recepciones de trabajos cuya contrata haya sido rescindida.....	308
2. Disposiciones facultativas	308
2.1. Definición y atribuciones de los agentes de la edificación.....	308
2.1.1. El Promotor.....	309
2.1.2. El Proyectista	309
2.1.3. El contratista	309
2.1.4. EL Director de Obra.....	310
2.1.5. El Director de la Ejecución de la Obra	310
2.1.6. Las entidades y laboratorios de control de calidad de la instalación	310
2.1.7. Los suministradores de productos.....	310
2.2. La dirección facultativa	311
2.3. Visitas facultativas.....	311
2.4. Obligaciones de los agentes intervinientes	311
2.4.1. El Promotor.....	311
2.4.2. El Proyectista	312

2.4.3. El contratista	313
2.4.4. El Director de Obra.....	315
2.4.5. El Director de la Ejecución de la Obra	317
2.4.6. Las entidades y laboratorios de control de calidad de la instalación	319
2.4.7. Los suministradores de productos.....	319
2.4.8. Los propietarios y los usuarios	319
2.5. Documentación final de la obra.....	320
3. Disposiciones económicas	320
3.1. Definición	320
3.2. Contrato de Obra	320
3.3. Criterio general.....	321
3.4. Fianzas	322
3.4.1. Ejecución de trabajos con cargo a la fianza	322
3.4.2. Devolución de las fianzas	322
3.4.3. Devolución de la fianza en el caso de efectuarse recepciones parciales.....	322
3.5. De los precios	322
3.5.1. Precio básico	323
3.5.2. Precio unitario.....	323
3.5.3. Presupuesto de ejecución del material (PEM)	324
3.5.4. Precios contradictorios.....	325
3.5.5. Reclamación de aumento de precios.....	325
3.5.6. Formas tradicionales de medir o de aplicar los precios	325
3.5.7. De la revisión de los precios contratados.....	325
3.5.8. Acopio de materiales.....	326
3.6. Obras de administración	326
3.7. Valoración y abono de los trabajos.....	326
3.7.1. Forma y plazos de abono de las obras	326
3.7.2. Relaciones valoradas y certificaciones	327

3.7.3. Mejora de obras libremente ejecutadas	327
3.7.4. Abono de trabajos presupuestados con partida alzada.....	328
3.7.5. Abono de trabajos ejecutados durante el plazo de garantía	328
3.7.6. Abono de trabajos ejecutados después del plazo de garantía	328
3.8. Indemnizaciones mutuas.....	328
3.8.1. Indemnización por retraso del plazo de terminación de las obras	329
3.8.2. Demora de los pagos por parte del promotor	329
3.9. Varios.....	329
3.9.1. Mejoras, aumentos y/o reducciones de obra	329
3.9.2. Unidades de obra defectuosas	329
3.9.3. Seguro de obras	329
3.9.4. Conservación de la obra.....	330
3.9.5. Uso por el Contratista de edificio o bienes del Promotor	330
3.10. Retenciones en concepto de garantía.....	330
3.11. Plazos de ejecución: Planning de la obra.....	331
3.12. Liquidación económica de las obras.....	331
3.13. Liquidación final de la obra.....	331
2) Pliego de condiciones técnicas particulares	332
1. Objeto	332
2. Prescripciones sobre los materiales	332
2.1. Condiciones técnicas generales	332
2.1.1. Calidad de los materiales	333
2.1.2. Pruebas y ensayos de los materiales	333
2.1.3. Materiales no consignados en los pliegos	333
2.2. Materiales para hormigones y morteros	333
2.2.1. Aguas	334
2.2.2. Áridos.....	334
2.2.3. Aditivos.....	335

2.2.4. Cementos.....	336
2.3. Hormigones	336
2.4. Aceros	337
2.4.1. Acero corrugado para armar	337
2.4.2. Acero laminado	337
2.5. Instalaciones eléctricas	337
3. Condiciones de equipos electromecánicos.....	338
3.1. Generalidades de los equipos electromecánicos.....	338
3.2. Control de calidad externo.....	339
3.3. Control de calidad interno	339
3.4. Pruebas de funcionamiento.....	340
3.5. Equipos de reserva.....	341
3.6. Documentación exigida de los equipos	341
4. Prescripciones de ejecución de las obras.....	342
4.1. Dirección de la obra.....	343
4.2. Ocupación y presencia del contratista	343
4.3. Condiciones generales de ejecución	343
4.3.1. Replanteo	343
4.3.2. Movimiento de tierras	344
4.3.2.1. Desbroce	344
4.3.2.2. Explanación y prestamos	344
4.3.2.3. Excavación en zanjas y pozos	344
4.3.2.4. Relleno y apisonado de zanjas o pozos	345
4.3.3. Red de saneamiento	346
4.3.4. Instalación de tuberías.....	347
4.3.5. Estructuras.....	347
4.3.6. Instalación eléctrica	348
4.3.7. Pinturas	350

4.4. Precauciones que adoptar	352
-------------------------------------	-----

ESTADO DE MEDICIONES.....353

1. Estado de mediciones357

1.1. Partida 1: Obra civil.....	357
---------------------------------	-----

1.2. Partida 2: Instalaciones	358
-------------------------------------	-----

1.3. Partida 3: Tanques y reactores.....	359
--	-----

1.4. Conducciones y accesorios.....	360
-------------------------------------	-----

1.5. Partida 5: Equipos electromecánicos e instrumentación	361
--	-----

1.6. Partida 6: Instalación eléctrica.....	362
--	-----

PRESUPUESTO363

1. Presupuesto de inversión367

1.1. Presupuesto de Ejecución Material (PEM).....	367
---	-----

1.1.1. Partida 1: Obra civil	367
------------------------------------	-----

1.1.2. Partida 2: Instalaciones	368
---------------------------------------	-----

1.1.3. Partida 3: Tanques y reactores	369
---	-----

1.1.4. Partida 4: Conducciones y accesorios.....	370
--	-----

1.1.5. Partida 5: Equipos electromecánicos e instrumentación.....	371
---	-----

1.1.6. Partida 6: Instalación eléctrica	372
---	-----

1.2. Presupuesto de Ejecución por Contrata (PEC)	374
--	-----

ÍNDICE DE FIGURAS:

Figura 1: Planificación del proyecto.	36
Figura 2: Esquema generalizado de un proceso cerámico.	38
Figura 3: Diagrama del proceso de producción de baldosas cerámicas.	42
Figura 4: Diagrama de una unidad de atomización.	43
Figura 5: Corrientes de un balance hídrico general.	47
Figura 6: Balance hídrico representativo de una empresa productora de baldosas cerámicas con operación de atomización (vertido cero).	48
Figura 7: Balance hídrico representativo de una empresa productora de baldosas cerámicas sin operación de atomización.	48
Figura 8: Representación general de las etapas de una EDAR.	49
Figura 9: Diagrama de una planta de tratamiento de agua residual tradicional en una empresa productora de baldosas cerámicas.	50
Figura 10: Escamas de ácido bórico.	58
Figura 11: Distribución de los compuestos ácidos del boro en función del <i>pH</i> del agua (Interpretación de Brønsted-Lowry).	58
Figura 12: Distribución del ácido bórico y el ion tetrahidroxiborato en % <i>molar</i> con la salinidad y de la temperatura del agua.	59
Figura 13: Fracción de ácido bórico y de ion tetrahidroxiborato en función del <i>pH</i> para un agua de mar con una salinidad del 35% y una temperatura de 10 y 35 °C respectivamente.	60
Figura 14: Fracción molar de las especies poliboradas en función del <i>pH</i> para una concentración de ácido bórico de 0,4 <i>M</i>	61
Figura 15: De izquierda a derecha, éster neutro de monoborato cis-diol, complejo de monoborato y complejo de bis(diol)borato.	61
Figura 16: Reacciones generales de complejación del boro con polioles.	62
Figura 17: Módulos de ósmosis inversa en formato espiral, de fibra hueca, tubular y en lámina (de izquierda a derecha).	65
Figura 18: Diagrama de las configuraciones de ósmosis inversa de paso único y paso doble.	66
Figura 19: Configuración de “retentados escalonados” habitual en procesos de ósmosis inversa con membranas en espiral.	66

Figura 20: Esquema del pretratamiento habitual de una ósmosis inversa	67
Figura 21: Representación aproximación del fenómeno de adsorción.	70
Figura 22: Representación de los diferentes tipos de poro de un sólido poroso (Clasificación de Rouquerol, 1990).	74
Figura 23: Ejemplo de isoterma de adsorción.....	80
Figura 24: Tipos genéricos de isothermas de fisisorción de gases según la IUPAC.	81
Figura 25: Clasificación primaria de isothermas de adsorción de solutos según Giles, Mac Ewan, Nakhua y Smith.....	82
Figura 26: Adsorción adyacente.	83
Figura 27: Adsorción plana.....	83
Figura 28: Afinidad del soluto.	84
Figura 29: Clasificación práctica de isothermas de adsorción líquido-sólido.	86
Figura 30 Representación de los diferentes mecanismos de adsorción.	86
Figura 31: Representación de la difusión molecular y la difusión Knudsen respectivamente.	90
Figura 32: Esquema de la estructura de un adsorbente ideal.	95
Figura 33: Ejemplos de distribución de tamaño de poro.	96
Figura 34: Esquema representativo de la estructura del grafito en comparación con la propuesta para el carbón activo.	100
Figura 35: Representación de un poro y de los puentes de hidrógeno de las moléculas de agua.....	101
Figura 36: Ejemplo de grupos funcionales con oxígeno en superficies carbonosas.....	102
Figura 37: Isothermas de adsorción boro-carbón activo.....	105
Figura 38: Complejos organoboro con el ácido tartárico y el ácido cítrico.....	106
Figura 39: Curvas de ruptura del boro a partir de una disolución acuosa de ácido bórico.....	108
Figura 40: Curvas de ruptura del boro a partir de una disolución acuosa de borax.....	108
Figura 41: Sistema continuo de adsorción en contracorriente mediante la utilización de un sistema mixto mezclador-separador de 2 pasos.	110
Figura 42: Dinámica del frente de adsorción en un lecho fijo.....	111
Figura 43: Esquema de zonas en una columna de adsorción.....	112
Figura 44: Ejemplo de curva de ruptura.	113

Figura 45: Ejemplo de perfil de concentración en el lecho de adsorción en el punto de ruptura.	114
Figura 46: Representación de un volumen $c = f(z, t)$ característico de un adsorbato.	114
Figura 47: Relaciones entre las diversas representaciones dinámicas de un lecho de adsorción.	115
Figura 48: Comportamientos límite de un lecho fijo: patrón constante para la isoterma favorable (izquierda), propagación de raíz cuadrada para la isoterma lineal (centro) y onda simple para la isoterma desfavorable (derecha).	116
Figura 49: Caso límite de un lecho de adsorción.	117
Figura 50: Columna de adsorción de lecho fijo de sección rectangular con sistema de soporte y distribución.	119
Figura 51: Columna de adsorción presurizada de sección cilíndrica con un lecho de carbón activo.	120
Figura 52: Ejemplo de configuración de lechos fijos en serie.	120
Figura 53: Horno de 6 pisos para la reactivación de carbón activo.	121
Figura 54: Regímenes límite de circulación de fluidos.	123
Figura 55: Variables en una columna de adsorción.	125
Figura 56: Comparativa de la curva de ruptura con comportamiento real y con comportamiento ideal de adsorción.	132
Figura 57: Curvas de ruptura real e ideal seccionadas para la resolución del balance de materia. ...	133
Figura 58: Aproximación realizada en el perfil de concentraciones para incorporar el método LUB.	135
Figura 59: Comparativa entre curvas de ruptura al operar con diferente caudal.	139
Figura 60: Curva de ruptura con las simplificaciones del Método LUB.	140
Figura 61: Balance hídrico aproximado de la empresa problema.	141
Figura 62: Tratamiento fisicoquímico anterior al tratamiento terciario.	142
Figura 63: Operaciones de recambio de columna de lecho fijo rellena de carbón activo.	145
Figura 64: Diagrama de flujo del tratamiento terciario.	149
Figura 65: Funcionamiento del filtro de profundidad con arena.	150
Figura 66: Gráfico descriptivo de la dinámica de filtración a lo largo del tiempo.	151
Figura 67: Esquema de la disposición de los filtros de profundidad.	152
Figura 68: Plano constructivo de los filtros de profundidad de arena.	155

Figura 69: Dimensiones de la columna de adsorción proporcionada por la empresa contratada.	158
Figura 70: Esquema descriptivo del circuito automatizado de cloración.	169
Figura 71: Diagrama relacional para la distribución en planta.	179
Figura 72: Parcela de emplazamiento del tratamiento terciario.....	180
Figura 73: Gráfica realizada para la determinación del TIR.....	190
Figura 74: Diagrama de Gantt de la planificación de ejecución del proyecto.....	191
Figura 75: Fotografía del carbón activo MG1050 12x40 de ChemiVall.	207
Figura 76: Montaje del dispositivo experimental de laboratorio de la columna de adsorción.	207
Figura 77: Curva de ruptura del boro en el ensayo a escala laboratorio.....	208
Figura 78: Representación de $1 - c/c_0$ (–) respecto al tiempo del ensayo en el laboratorio.....	209
Figura 79: BEM al filtro de profundidad de arena (etapa de filtrado).	212
Figura 80: BEM al filtro de profundidad de arena (etapa de lavado).	213
Figura 81: BEM a la columna de adsorción.....	217
Figura 82: Organización de los tramos de las conducciones hidráulicas en el tratamiento terciario (dimensiones no representativas).....	238
Figura 83: Organización de los puntos en las conducciones hidráulicas en el tratamiento terciario para llevar a cabo balances de energía mecánica (dimensiones no representativas).	249

ÍNDICE DE TABLAS:

Tabla 1: Tareas planificadas en el proyecto.....	35
Tabla 2: Resumen de los posibles orígenes y vías de emisiones en la industria cerámica.	39
Tabla 3: Consumo medio aproximado de agua por superficie de baldosa cerámica fabricada.	43
Tabla 4: Análisis químico promedio de las aguas residuales industriales sin depurar de una empresa productora de baldosas cerámicas.....	46
Tabla 5: Índices de reciclado de aguas residuales del proceso de fabricación que se alcanzan en diferentes sectores de la industria cerámica.....	47
Tabla 6: Valores límite de vertido a cauce público según datos de EPSAR y una EDAR ubicada en Castellón.	52
Tabla 7: Limitaciones en las características del agua depurada para su reutilización según el Real Decreto 1620/2007.....	53
Tabla 8: Efecto de la temperatura sobre la solubilidad en agua y la primera constante de disociación K_a del ácido bórico a presión atmosférica.	59
Tabla 9: Concentración límite de boro en el agua según diferentes instituciones.	63
Tabla 10: Comparación de características entre los diferentes tipos de módulos de ósmosis inversa.	65
Tabla 11: Resumen de los tipos de adsorción.....	76
Tabla 12: Modelos comunes de isoterma de adsorción.	88
Tabla 13 Aplicaciones típicas de diversos adsorbentes comunes.....	97
Tabla 14: Constantes de Langmuir para la adsorción de ácido bórico y borax en carbón activo.....	105
Tabla 15: Resultados del experimento del estudio de Rajakovíc y Ristíc.	107
Tabla 16: Análisis químico promedio de las aguas residuales en la salida de la balsa de homogeneización final del tratamiento fisicoquímico.	146
Tabla 17: Caracterización de la arena de los lechos de profundidad.....	150
Tabla 18: Dimensiones y características de la operación de filtrado.....	156
Tabla 19: Dimensiones y características de la operación de adsorción con GAC.....	159
Tabla 20: Dimensiones y características de la balsa pulmón.....	160
Tabla 21: Dimensiones y características del reactor de elevación de pH	161
Tabla 22: Dimensiones y características del depósito de hidróxido de sodio.....	162

Tabla 23: Características de la bomba dosificadora MEMDOS DX 4 de Lutz-JESCO.....	163
Tabla 24: Características del mezclador VHD3-06 03 B 04 de FluidMix.....	164
Tabla 25: Dimensiones y características de la operación de adsorción con IGAC.	165
Tabla 26: Dimensiones y características del reactor de disminución de pH	167
Tabla 27: Dimensiones y características del tanque de cloración.....	168
Tabla 28: Dimensiones y características del tanque final de almacenamiento.....	170
Tabla 29: Características del agitador VPS3 de FluidMix.....	171
Tabla 30: Características de la bomba Prisma 15 2 de Espa.....	172
Tabla 31: Características de la bomba Prisma 15 1 de Espa.....	173
Tabla 32: Características de la bomba Drain 100 de Espa.....	174
Tabla 33: Características de la bomba Tecno 5 3 de Espa.....	175
Tabla 34: Definición de espacios de la planta y sus aplicaciones correspondientes.....	176
Tabla 35: Descripción de las relaciones en la tabla relacional para la distribución de la planta.	177
Tabla 36: Tabla relacional para la distribución de la planta.	178
Tabla 37: Resumen del presupuesto de inversión ($P0$).	181
Tabla 38: Costes eléctricos en un año de explotación (CE).....	183
Tabla 39: Coste de reactivos en un año de explotación (CR).	184
Tabla 40: Costes de adsorción en un año de explotación (CA).....	185
Tabla 41: Resumen de costes directos en un año de explotación (CD).	185
Tabla 42: Costes indirectos en un año de explotación (CI).	186
Tabla 43: Resumen del presupuesto de explotación al año (PE).....	186
Tabla 44: Estudio de viabilidad económica.	188
Tabla 45: Planificación de las actividades de la ejecución del proyecto.	191
Tabla 46: Propiedades del GAC tipo K-81/B basado en cascara de coco.	203
Tabla 47: Ejemplo de ensayo para determinar la isoterma de adsorción.....	204
Tabla 48: Características del GAC MG1050 12x40 de ChemiVall.....	206
Tabla 49: Características de la columna de laboratorio.	207
Tabla 50: Interpolación lineal realizada para obtener el punto de ruptura.	209

Tabla 51: Características físicas habituales de un filtro de profundidad de arena.	211
Tabla 52: Descripción de los tramos de las conducciones hidráulicas.	237
Tabla 53: Velocidades típicas de líquidos en tuberías de acero.	239
Tabla 54: Descripción y parámetros de los puntos seleccionados en las conducciones hidráulicas para aplicar balances de energía mecánica.	248
Tabla 55: Constantes de los accidentes en las conducciones hidráulicas.	250
Tabla 56: Requisitos de los equipos de bombeo.	272
Tabla 57: Cantidad de elementos en la partida 1 del estado de mediciones.	357
Tabla 58 Cantidad de elementos en la partida 2 del estado de mediciones.	358
Tabla 59: Cantidad de elementos en la partida 3 del estado de mediciones.	359
Tabla 60: Cantidad de elementos en la partida 4 del estado de mediciones.	360
Tabla 61: Cantidad de elementos en la partida 5 del estado de mediciones.	361
Tabla 62: Cantidad de elementos en la partida 6 del estado de mediciones.	362
Tabla 63: Presupuesto de Ejecución Material parcial de la partida 1 (<i>PO</i>).	367
Tabla 64: Presupuesto de Ejecución Material parcial de la partida 2 (<i>PI</i>).	368
Tabla 65: Presupuesto de Ejecución Material parcial de la partida 3 (<i>PT</i>).	369
Tabla 66: Presupuesto de Ejecución Material parcial de la partida 4 (<i>PC</i>).	370
Tabla 67: Presupuesto de Ejecución Material parcial de la partida 5 (<i>PEq</i>).	371
Tabla 68: Presupuesto de Ejecución Material parcial de la partida 6 (<i>PE</i>).	372
Tabla 69: Presupuesto de ejecución material (<i>PEM</i>).	373
Tabla 70: Presupuesto de Ejecución por Contrata (<i>PEC</i>).	374

Siglas y acrónimos:

UJI: Universidad Jaume I.

ITC: Instituto de Tecnología cerámica.

EDAR: Estación de Depuración de Aguas Residuales.

UE: Unión Europea.

C: Coagulación.

F: Floculación.

D: Decantación.

BR: Biorreacción.

E: Estabilización.

DI: Digestión.

DH: Deshidratación.

VLE: Valor Límite de Emisión.

VMA: Valor Máximo Admisible.

UFC: Unidad Formadora de Colonias.

UNT: Unidad Nefelométrica de Turbidez.

NCA: Norma de Calidad Ambiental.

OMS: Organización Mundial de la Salud.

HAP: Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos.

TFC: Compuesto de película fina (Thin Film Composite).

BET: Brunauer-Emmett-Teller.

IUPAC: Unión Internacional de Química Pura y Aplicada (International Union of Pure and Applied Chemistry).

MTZ: Zona de Transferencia de Materia (Mass Transfer Zone).

VCM: Cloruro de Vinilo (Vinyl Chloride Monomer).

PCBs: Bifenilos Policlorados (Polychlorinated Biphenyl).

PAC: Carbón Activo en Polvo (Powdered Activated Carbon).

GAC: Carbón Activo Granular (Granular Activated Carbon).

LES: Longitud de Lecho Saturado (Length of Equilibrium Section).

LUB: Longitud de Lecho Virgen (Length of Unused Bed).

EBCT: Tiempo de contacto de lecho vacío (Empty Bed Contact Time).

IGAC: Carbón Activo Granular Impregnado (Impregnated Granular Activated Carbon).

SLP: Systematic Layout Planning.

PEM: Presupuesto de Ejecución Material.

PEC: Presupuesto de Ejecución por Contrata.

IVACE: Instituto Valenciano de Competitividad Empresarial.

BEM: Balance de Energía Mecánica.

Nomenclatura:

σ : Conductividad (S/m).

pH : Potencial de hidrógeno (acidez) ($-$). $[-\log(c_{H^+})]$

DQO : Demanda química de oxígeno ($mg\ O_2/L$).

DBO_5 : Demanda biológica de oxígeno durante 5 días a una temperatura de $20^\circ C$ ($mg\ O_2/L$).

pK_a : Logaritmo negativo ($-\log$) de la constante de disociación ácida K_a .

K_a : Constante de disociación ácida ($-$).

ν_A : Coeficiente estequiométrico del adsorbato ($-$).

ν_B : Coeficiente estequiométrico del adsorbente ($-$).

ν_{AB} : Coeficiente estequiométrico del complejo adsorbato-adsorbente ($-$).

k_L : Coeficiente de transferencia de materia a través de un fluido líquido (m/s).

D_e : Coeficiente de difusión efectiva (m^2/s).

a : Área específica (m^2/m^3 o m^2/kg).

A_S : Área superficial (m^2).

ρ : Densidad (kg/m^3).

D_p : Diámetro de partícula (m).

Φ : Esfericidad ($-$).

$D_{p_{eq}}$: Diámetro de partícula equivalente (m).

A_p : Área superficial de una partícula (m^2).

V_p : Volumen de una partícula (m^3).

d_p : Diámetro de poro (m).

m_b : Masa de adsorbente (kg).

ε : Porosidad interna ($-$).

τ : Tortuosidad ($-$).

L_p : Longitud de poro (m).

L : Longitud del lecho o grano (m).

$\rho_{ap\ b}$: Densidad aparente del adsorbente (volumen de sólido + volumen vacío interno) (kg/m^3).

ρ_b : Densidad del absorbente (volumen de sólido) (kg/m^3).

Q_v : Caudal volumétrico (m^3/s).

V : Volumen (m^3).

\dot{m}_A : Flujo másico ($kg/m^2 \cdot s$).

c_{a0}, c_0 : Concentración inicial del componente a adsorber (mol/L).

p_{a0}, p_0 : Presión relativa inicial del componente a adsorber (Pa).

T : Temperatura ($^{\circ}C$).

P : Presión (Pa).

ΔG° : Energía libre de Gibbs (J).

ΔH° : Entalpía (J).

ΔS° : Entropía (J).

ΔG_{Ads}° : Energía libre de Gibbs de adsorción (J).

ΔH_{Ads}° : Entalpía de adsorción (J).

ΔS_{Ads}° : Entropía de adsorción (J).

q_a, q : Cantidad de sustancia adsorbida por unidad de masa de adsorbente (mol/kg o kg/kg).

$q_{a_{eq}}, q_{eq}, q_e$: Cantidad de adsorbato en equilibrio por unidad de masa de adsorbente (mol/kg o kg/kg).

c_a, c : Concentración de componente a adsorber en el seno del líquido (mol/L).

$c_{a_{eq}}, c_{eq}, c_e$: Concentración del componente a adsorber en equilibrio (mol/L).

p_a, p : Presión del componente a adsorber (Pa).

$p_{a_{eq}}, p_{eq}$: Presión del componente a adsorber en equilibrio (Pa).

n_a, n : Cantidad molar de adsorbato (mol).

m_a, m : Cantidad másica de adsorbato (kg).

p_a°, p° : presión de saturación del componente a adsorber (Pa).

K : Constante de Henry (L/kg).

K_L : Constante de Langmuir (L/kg).

q_m : Máxima capacidad de adsorbato en la monocapa (mol/kg).

R_L : Factor de separación (—).

n_{BET} : Número de capas en el modelo de BET (—).

K_{BET1} : Parámetro de BET para la primera capa (L/kg).

K_{BET2} : Parámetro de BET para otras capas (L/kg).

c_{BET} : Constante de BET (—).

q_{mBET} : Máxima capacidad de BET de adsorbato en la monocapa (mol/kg).

c_s : Solubilidad del adsorbato (mg/L).

c_a^i, c^i : Concentración del componente a adsorber en la interfase, la superficie del adsorbente (mol/L).

D_M : Coeficiente de difusividad molecular (m^2/s).

μ : Viscosidad dinámica ($Pa \cdot s$).

M_b : Masa molar del adsorbente (kg/mol).

v_a : Volumen molar de soluto (m^3/mol).

D_K : Coeficiente de difusividad Knudsen (m^2/s).

u : Velocidad intersticial (m/s).

R : Constante de los gases ideales ($Pa \cdot m^3/mol \cdot K$).

M_a Masa molar del adsorbato (kg/mol).

D_n : Coeficiente de difusión neta (m^2/s).

D_e : Coeficiente de difusión efectiva (m^2/s).

D_s : Coeficiente de difusión superficial (m^2/s).

D_0 : Factor pre-exponencial de la difusión superficial (m^2/s).

E_s : Energía molar de activación de la difusión superficial (J/mol).

z : Espesor (m).

D_i : Coeficiente de difusión global de materia (m^2/s).

\dot{Q}_A : Flujo de calor (W/m^2).

h : Coeficiente de transferencia de calor por convección ($W/m^2 \cdot K$).

T^i : Temperatura en la interfase, la superficie del adsorbente ($^{\circ}C$).

k_e : Coeficiente efectivo de transmisión de calor por conducción ($W/K \cdot m$).

R : Distancia radial (m).

R_p : Radio de un granulo de adsorbente (m).

Bi_m : Número de Biot para la materia ($-$).

Bi_h : Número de Biot para el calor ($-$).

α_{AB} : Selectividad relativa ($-$).

X_i : Fracción molar del componente i en la fase sólida (adsorbido) ($-$).

Y_i : Fracción molar del componente i en la fase fluida ($-$).

t : tiempo (s).

L_{LES} : Longitud de la zona LES (m).

L_{MTZ} : Longitud de la zona MTZ (m).

L_{LUB} : Longitud de la zona LUB (m).

t_{op} : Tiempo de operación (s).

c_R : Concentración límite estipulada (mol/L).

t_B : Instante en el que ocurre el punto de ruptura (s).

t_s : Instante en el que la concentración en el efluente es la mitad de la concentración inicial (s).

t_e : Instante en el que la concentración en el efluente es igual a la concentración inicial (s).

L_s : Lugar en el lecho donde la concentración es la mitad de la concentración en la entrada (m).

L_e : Lugar en el lecho donde la concentración es igual a la concentración inicial (m).

D : Diámetro (m).

L_C : Longitud de la columna o "adsorbedor" (m).

Re : Módulo de Reynolds ($-$).

$v, v_{superficial}$: Velocidad superficial media (m/s).

Re_m : Módulo de Reynolds para lechos porosos ($-$).

ρ_{Lecho} : Densidad del lecho (volumen de sólido + volumen vacío interno + volumen vacío externo) (kg/m^3).

ε_{Lecho} : Porosidad del lecho (vacío externo) ($-$).

ε_T : Porosidad total (vacío interno + vacío externo) ($-$).

ρ_w : Densidad húmeda (volumen de sólido + volumen de fluido) (kg/m^3).

ρ_f : Densidad del fluido (kg/m^3).

$A, A_{Lecho\ vacío}$: Área de lecho vacío (m^2).

v', v_{Real} : Velocidad real media (m/s).

$A', A_{Lecho\ empacado}$: Área de lecho empacado (m^2).

$EBCT, \tau$: Tiempo espacial (s).

V_{Lecho} : Volumen que ocupa el lecho (m^3).

\dot{m}_{A_0} : Flujo másico en la entrada ($kg/m^2 \cdot s$).

Q_{v_0} : Caudal volumétrico en la entrada (m^3/s).

$V_{Tratado}$: Volumen de agua total tratado por el lecho (m^3).

q_{a_s} : Cantidad de sustancia adsorbida por unidad de masa de adsorbente en el instante t_s ($moles/kg$ o kg/kg).

C : Constante ($-$).

h : Entalpía específica (J/kg).

e_p : Energía potencial específica (J/kg).

e_k : Energía cinética específica (J/kg).

q : Calor específico (J/kg).

w : Trabajo específico (J/kg).

u : Energía interna específica (J/kg).

α : Factor de turbulencia ($-$).

F : pérdida de energía mecánica (J).

z : Altura (m).

f : Factor de fricción ($-$).

h_s : Carga del sistema (m).

h_B : Carga de la bomba (m).

f_u : Fracción de capacidad utilizada ($-$).

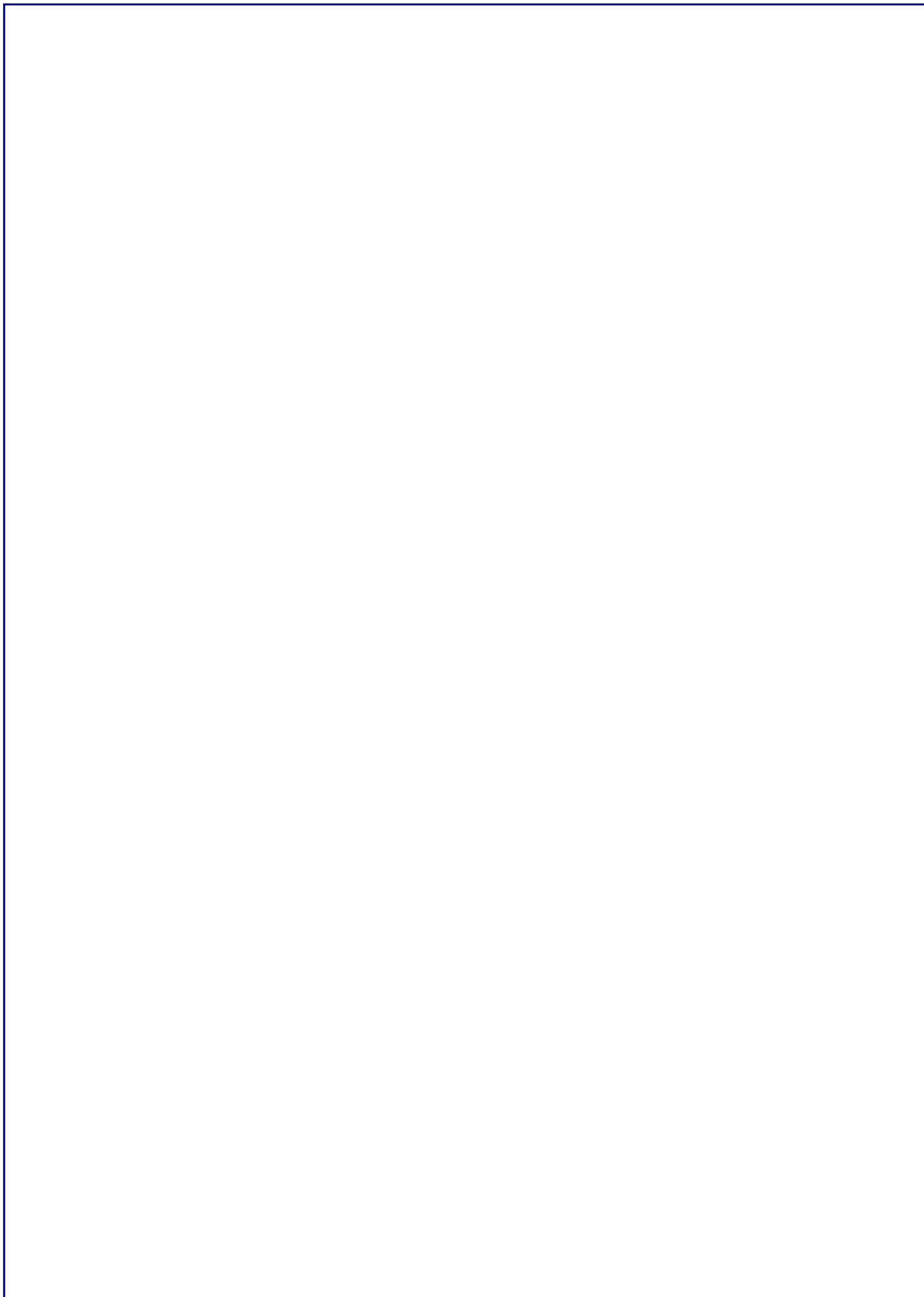
f_{nu} : Fracción de capacidad no utilizada ($-$).

P : Potencia (kW).

w : Velocidad angular (rpm).

e : Espesor (m).

Memoria



ÍNDICE DE LA MEMORIA:

1. Justificación	33
2. Objetivos	34
2.1. Objetivo general	34
2.2. Objetivos específicos.....	34
3. Alcance	35
4. Planificación de elaboración.....	35
5. Antecedentes	37
5.1. La industria cerámica.....	37
5.2. Uso del agua en el proceso de fabricación de baldosas cerámicas esmaltadas	41
5.3. Depuración del agua residual en el sector cerámico.....	46
5.3.1. Regulación de la reutilización de aguas depuradas.....	52
5.4. El boro y sus compuestos	56
5.4.1. Distribución del boro en el planeta	56
5.4.2. El boro en medio acuoso.....	57
5.4.3. Efectos en la salud	62
5.4.4. Tecnologías de eliminación del boro	64
5.4.4.1. Ósmosis inversa.....	64
5.4.4.2. Intercambio iónico.....	68
5.4.4.3. Electrodialisis	69
5.5. Adsorción.....	69
5.5.1. Historia.....	71
5.5.2. Dinámica.....	72
5.5.3. Termodinámica y equilibrio.....	78
5.5.4. Cinética	89
5.5.5. Adsorbentes.....	95
5.5.5.1. Carbón activo.....	100
5.5.5.2. Adsorción de boro en carbón activo	104

5.5.6. Tecnología de las unidades de adsorción	109
5.5.6.1. Consideraciones de la mecánica de fluidos en los lechos fijos	122
5.5.6.2. Métodos de dimensionado de las unidades de adsorción	130
5.5.6.3. Método LUB	131
6. Análisis de soluciones	141
7. Requisitos de diseño	146
8. Descripción del proceso	148
9. Maquinaria e instalaciones	155
10. Definición de espacios	176
11. Distribución de la planta.....	177
12. Ubicación y emplazamiento de la actividad.....	180
13. Resumen del presupuesto de inversión.....	181
14. Presupuesto de explotación	182
14.1. Costes directos.....	182
14.1.1. Costes eléctricos.....	182
14.1.2. Coste de reactivos	183
14.1.3. Costes de adsorción.....	184
14.2. Costes indirectos.....	185
15. Estudio de viabilidad económica.....	187
16. Planificación de ejecución.....	191
17. Normas y referencias aplicadas	192
17.1. Bibliografía.....	192
18. Conclusión.....	196

1. Justificación

Actualmente los procesos de adsorción están implicados en gran cantidad de sectores al ser realmente útiles y competentes. Algunos usos habituales de la adsorción tienen lugar en la purificación de efluentes, la descontaminación de vertidos y la catalización de reacciones.

Resulta interesante la investigación de los mecanismos de separación mediante adsorción, en este caso, con un lecho de carbón activo, ante la posibilidad de usar estas unidades y sustituir los procedimientos de separación industriales más extendidos para eliminar ciertos contaminantes como el boro, puesto que podría suponer una inversión económica menor para las empresas e incluso una posible mejora del rendimiento de separación.

Por otro lado, el consumo actual de agua en la industria cerámica es relativamente alto, el conjunto de los procesos de producción y otros paralelos a él como la limpieza, el intercambio de calor u otros, genera una gran cantidad de agua residual que debe ser debidamente depurada para ser vertida o aprovechable en otra actividad. Una empresa convencional dedicada a la producción de baldosas cerámicas esmaltadas produce aguas residuales con una cantidad de boro tal que, para poder ser eliminadas mediante vertido, es necesaria su reducción. Este hecho hace que la concentración en compuestos de boro sea un parámetro crítico debido a que requiere tratamientos de separación específicos de elevado coste como el intercambio iónico o la ósmosis inversa. En este proyecto se estudia la posibilidad de usar un sistema de separación mediante adsorción con carbón activo impregnado para la eliminación de este boro, ya que podría resultar en una mejora económica respecto a la alternativa utilizada actualmente, el transporte del agua residual a atomizadoras donde el agua se elimina por evaporación. Además, esta nueva opción podría alcanzar una buena eficacia sin la necesidad de una inversión económica similar al tratamiento líder en purificación de aguas residuales y eliminación de boro, la ósmosis inversa.

En concreto, en este proyecto, se trata el caso de una empresa cerámica que no tiene acceso a atomizadoras suficientemente cerca como para abaratar la eliminación del agua residual mediante su evaporación y emisión a la atmósfera (la atomizadora más cercana se encuentra a 39 km). Por ello, se estudia la implantación de este tratamiento terciario fundamentado en la adsorción de forma que se consigan ahorrar los sobrecostes derivados del transporte del agua residual a atomizadoras tan alejadas.

2. Objetivos

A continuación, se detalla tanto el objetivo general como una relación de los diversos objetivos específicos del proyecto:

2.1. Objetivo general

El objetivo final del proyecto es buscar una alternativa para gestionar el agua residual producida en una empresa productora de baldosas cerámicas esmaltadas, dado que su actual eliminación por evaporación supone un sobre coste al requerir el traslado a una atomizadora.

2.2. Objetivos específicos

Para alcanzar el objetivo general del proyecto, se deben cumplir los siguientes objetivos específicos:

- Realizar un estudio en profundidad sobre los métodos de depuración del boro el carbón activo.
- Estudiar el fenómeno de la adsorción para los contaminantes cuya extracción se desea.
- Elaborar una base de datos con información útil respecto a la adsorción de boro en carbón activo y los temas que se tratan en el proyecto.
- Estudiar el proceso de depuración mediante adsorción, diferenciar las partes del proceso y realizar la distribución de estas en el espacio disponible.
- Seleccionar un método de diseño del lecho y llevar a cabo el dimensionamiento a partir del caudal de agua industrial respetando los requisitos de diseño.
- Realizar ensayos a nivel de laboratorio para obtener los datos requeridos para el diseño y poder optimizar el lecho.
- Conseguir alcanzar los rendimientos deseados en el efluente del tratamiento garantizando la calidad del agua.
- Estimar el presupuesto económico necesario para la construcción del sistema.
- Llevar a cabo un estudio completo para determinar la viabilidad económica del proyecto.
- Comparar el resultado final con el sistema utilizado actualmente de transporte en camiones cisterna y comprobar si efectivamente es más económico o se obtienen peores resultados.
- Conseguir independizar la gestión del agua residual de la atomizadora.

3. Alcance

El proyecto pretende estudiar la efectividad de la tecnología de adsorción con carbón activo granular para la eliminación del boro residual en los excedentes de las aguas residuales de una empresa cerámica productora de baldosas, diseñar un dispositivo efectivo para desempeñar esta función y evaluar la viabilidad económica de la construcción de un sistema industrial con estas características.

4. Planificación de elaboración

Para llevar a cabo el proyecto se realiza una planificación de las diferentes actividades a realizar. En la Tabla 1 se pueden observar las diversas tareas programadas para dar por acabado el proyecto y en la Figura 1 se pueden ver estas tareas implementadas en un diagrama de Gantt. Cabe señalar que debido a la crisis sanitaria provocada por la pandemia del Covid-19, la planificación se ha visto alterada fuertemente y se han tenido que realizar modificaciones e incluso posponer ciertas tareas.

Tabla 1: Tareas planificadas en el proyecto.

Tarea	Descripción	Duración	Inicio	Fin
A	Determinación del título	1 día	04-feb-2020	
B	Análisis económico previo y definición del procedimiento	1 día	06-jul-2020	
C	Planificación	5 días	06-jul-2020	10-jul-2020
D	Estudio bibliográfico	421 días	05-feb-2020	31-mar-2021
E	Ensayos en el laboratorio	137 días	06-jul-2020	19-nov-2020
F	Defensa de los ensayos en el laboratorio	1 día	20-nov-2020	
G	Diseño y definición del proyecto	5 días	10-abr-2021	15-abr-2021
H	Realización de cálculos justificativos y diseño	16 días	15-abr-2021	31-may-2021
I	Selección de maquinaria, realización de presupuesto de inversión y de explotación	14 días	01-jun-2021	30-jun-2021
J	Realización del estudio de viabilidad económica, planos y finalización de los documentos	76 días	30-jun-2021	14-sep-2021
K	Conclusión y final del proyecto	16 días	14-sep-2021	5-oct-2021

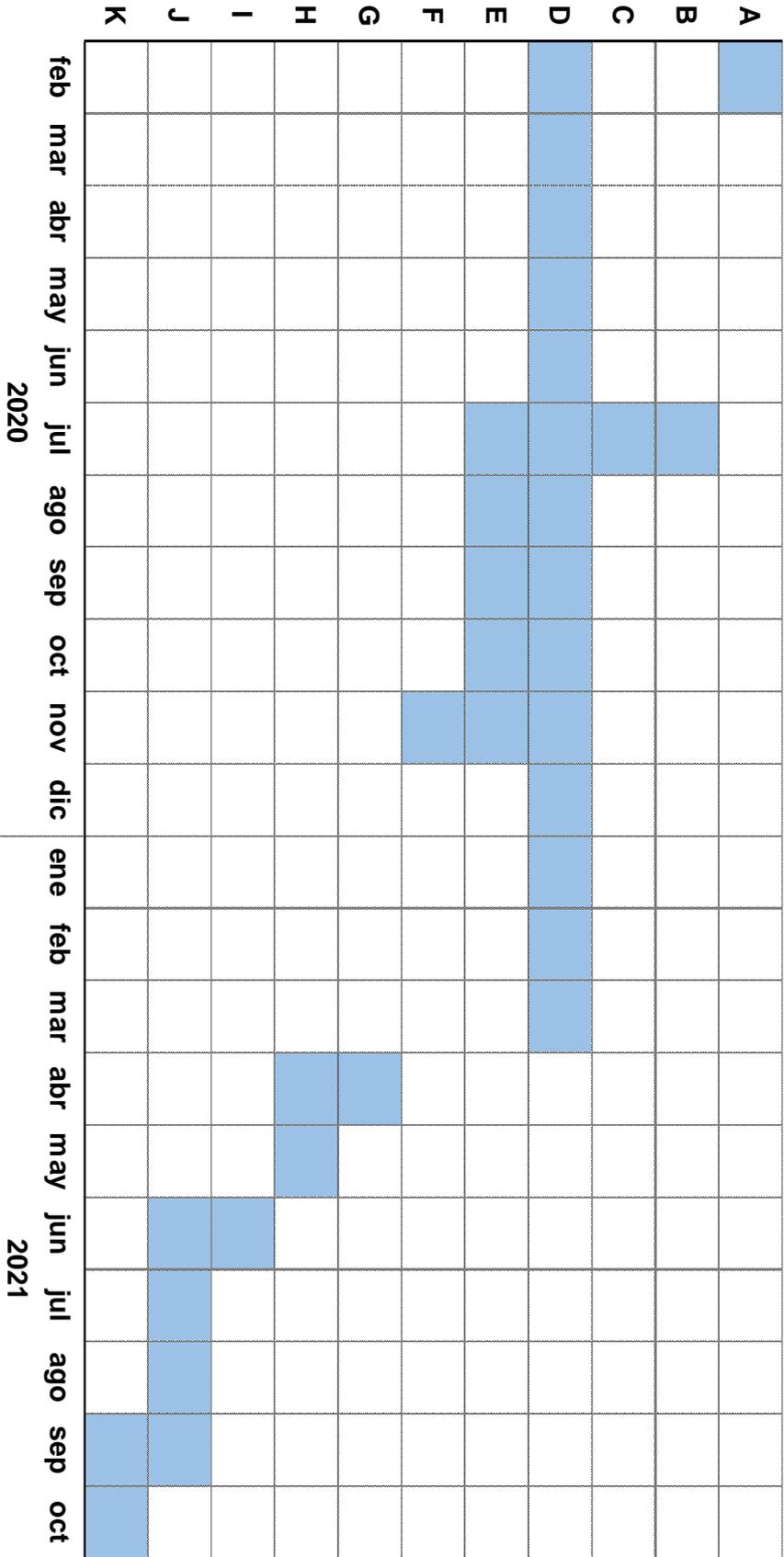


Figura 1: Planificación del proyecto.

5. Antecedentes

En este apartado se detallan los estudios llevados a cabo para disponer de una base de datos fiable de información sobre los diversos aspectos que existen a la hora de implantar un sistema de depuración del calibre de este proyecto.

La investigación se ha centrado primordialmente en la problemática de las aguas residuales en la industria cerámica, la depuración de aguas residuales mediante el fenómeno de la adsorción, el carbón activo, sus propiedades y su uso en adsorción, la caracterización del agua a tratar y el estudio del contaminante.

5.1. La industria cerámica

Generalmente, el término “productos cerámicos” se utiliza para designar materiales mayoritariamente de composición inorgánica formados por compuestos no metálicos estabilizados mediante un proceso de cocción que transforma los minerales constituyentes en función del tiempo y la temperatura, dando lugar, habitualmente, a una mezcla de nuevos minerales y fases vítreas. La cerámica puede ser esmaltada o no esmaltada, porosa o vitrificada. Entre las propiedades características de los productos cerámicos figuran una gran resistencia al desgaste, una larga vida útil, la inercia química y la inocuidad, la resistencia al calor y al fuego, la resistencia eléctrica y a veces también una porosidad específica.

Ciertos productos cerámicos con un precio relativamente barato, pero un coste de transporte elevado por su peso, como los ladrillos, se fabrican en casi todos los países, pero otros productos más especializados y de mayor precio se fabrican principalmente en los países que disponen de las materias primas esenciales necesarias, la competencia y los conocimientos técnicos. Por ejemplo, gran parte de las baldosas cerámicas se fabrican en Italia y en España. En el año 2019, España fue el 2º país exportador del mundo y el 5º productor, generando 3757 millones de euros con una producción de 510 millones de metros cuadrados (ASCER, 2021). Por esta razón, el sector de fabricación de azulejos y pavimentos es clave en la economía e industria valenciana y española por su aportación económica, social y a la I+D+i.

La Figura 2 muestra de forma esquemática el proceso cerámico típico, así como los medios de suministro y de eliminación posibles o necesarios. Por lo general, las materias primas se mezclan, moldean, prensan o extrudan minuciosamente con agua hasta darles forma y, normalmente, esa agua se evapora en los secaderos y hornos. Durante la cocción se requiere un gradiente de temperaturas muy preciso para conseguir productos adecuados y, después, es necesario un enfriamiento controlado de manera que se libere gradualmente el calor. Por último, se procede al embalaje y al almacenamiento de los productos para su entrega.

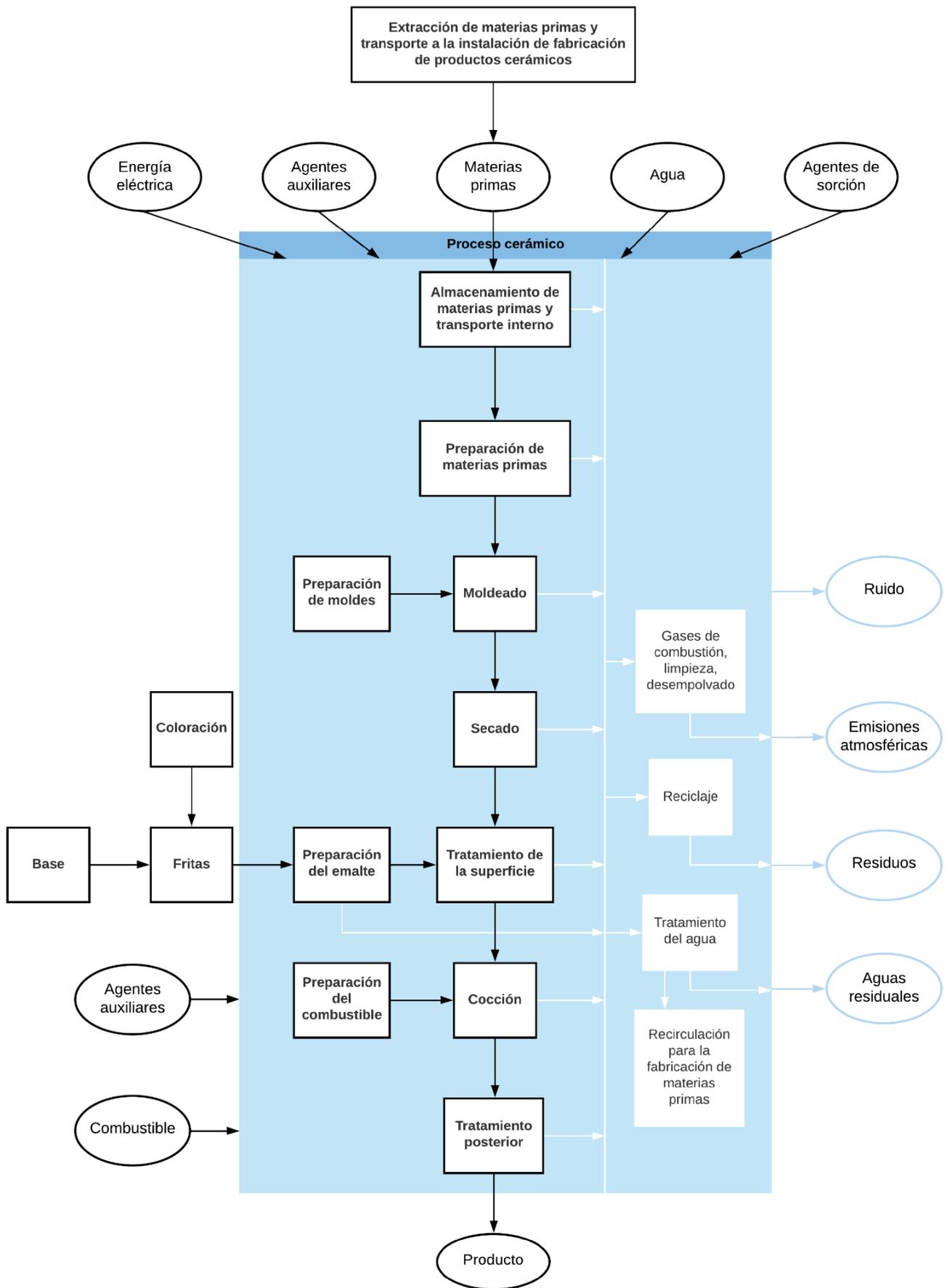


Figura 2: Esquema generalizado de un proceso cerámico.

La fabricación puede llevarse a cabo utilizando diferentes tipos de hornos, con una amplia gama de materias primas y con diversas formas, tamaños y colores. No obstante, el proceso general de fabricación es bastante uniforme independientemente de los materiales utilizados y del producto final, aunque, en el caso de pavimentos y revestimientos, cerámica doméstica, sanitaria y técnica, es necesario llevar a cabo con frecuencia un proceso de cocción en varias etapas. En función de los procesos específicos de producción, las instalaciones de fabricación de productos cerámicos generan determinadas emisiones a la atmósfera, al agua y al suelo. En la Tabla 2 se puede observar un resumen de los posibles orígenes de las emisiones en las distintas etapas de la fabricación cerámica y las vías de emisión correspondientes.

Tabla 2: Resumen de los posibles orígenes y vías de emisiones en la industria cerámica. (Comisión Europea, 2011)

Etapa del proceso	Origen de emisiones				Destino de emisiones			Ruido
	Materia prima	Cuerpo cerámico	Decoración	Combustible	Aire	Agua	Tierra	
Preparación de materias primas								
Machacado y molienda primaria/secundaria	■				■		■	■
Molituración en seco y mezcla en seco	■			■ ¹	■		■	■
Molituración en húmedo y mezcla en húmedo	■					■	■	■
Criba/Clasificación	■				■		■	■
Transporte	■				■		■	
Almacenamiento en silos	■				■			■
Preparación del cuerpo								
Barbotina de colar		■				■		
Pasta de extrusión para moldeado de plástico suave		■			■	■	■	
Cuerpos para moldeado de plástico duro mediante procesos de eliminación de virutas		■				■	■	
Polvo de prensado en seco, proceso en seco		■			■	■	■	■

Polvo de prensado en húmedo, proceso de secado por pulverización		■		■		■	■	■		■
Granulación		■				■				■
Moldeado										
Colada en barbotina		■					■			
Moldeado de plástico suave (extrusión)		■					■	■		
Moldeado por corte		■						■		
Prensado		■				■	■ ²	■		■
Tratamiento de cuerpos crudos		■				■	■	■		
Secado										
Secaderos intermitentes y continuos		■		■		■				■
Decoración										
Esmaltado			■			■	■	■		
Engobe			■			■ ³	■	■		
Impresión			■			■	■	■		
Cocción										
Hornos intermitentes y continuos	■	■	■	■		■				■
Tratamiento posterior		■	■			■	■	■		■
Almacenamiento de material	■	■		■		■ ⁴				■

¹⁾ Posible para aplicaciones especiales, por ejemplo, desbastado en caliente por vía seca de los agregados de arcilla expandida.

²⁾ Solo agua de refrigeración.

³⁾ Para algunos sectores, por ejemplo, baldosas de cerámica.

⁴⁾ El almacenamiento de materiales también abarca el almacenamiento de combustibles.

El agua se utiliza en casi todos los procesos cerámicos para la preparación de arcillas y barbotinas de esmaltado, masas de arcilla para extrusión, “barros” para moldear, polvos atomizados,

trituration/molturación por vía húmeda, refrigeración u operaciones de lavado o limpieza. Su calidad puede ser esencial para el esmaltado, el lavado y la refrigeración. Las aguas residuales del proceso de fabricación se generan mayoritariamente por la limpieza de equipos y el lavado y suspensión de los materiales arcillosos durante el proceso de fabricación, pero también existen otras fuentes menores como los vertidos de los lavadores de gases residuales por vía húmeda, el agua utilizada para refrigeración o el agua sanitaria residual. Generalmente, contienen elementos minerales y otros materiales inorgánicos como el boro, pequeñas cantidades de numerosas especies orgánicas y algunos metales pesados. El tratamiento tradicional suele consistir en una decantación fisicoquímica de los sólidos con la acción de agentes coagulantes y floculantes. El agua depurada suele reciclarse en circuitos cerrados para la reutilización en la producción del soporte cerámico. A continuación, en el apartado 5.2. Uso del agua en el proceso de fabricación de baldosas , se estudia con mayor detalle la necesidad y el uso del agua exclusivamente para el caso de las industrias cerámicas de producción de baldosas cerámicas esmaltadas.

5.2. Uso del agua en el proceso de fabricación de baldosas cerámicas esmaltadas

Las baldosas cerámicas son losas fabricadas a partir de arcillas y/u otros materiales inorgánicos que sirven para cubrir suelos y paredes. Tradicionalmente son cuadradas o rectangulares y suelen moldearse por extrusión o prensado en seco a temperatura ambiente, secarse y cocerse a temperaturas suficientes para alcanzar las propiedades deseadas. Hay muchas formas de clasificar las baldosas cerámicas disponibles en el mercado: formadas por prensado en seco o extrusión; con cuerpos porosos, compactos o vitrificados; con cuerpos blancos o de color (rojizas), esmaltado o sin esmaltar.

La primera tarea es describir el proceso de producción de baldosas cerámicas para establecer el uso que se le da al agua y descubrir cuales son las etapas en que se generan las aguas residuales, así como las características químicas de estas para poder descartar tratamientos y saber a qué se está enfrentando este proyecto exactamente.

Pese a que existe una forma de elaborar polvo cerámico sin incorporar agua en la molturación, la manera más extendida de elaborar los soportes cerámicos es mediante una vía húmeda. En la Figura 3 se puede observar, a grandes rasgos, un esquema del proceso de producción de baldosas cerámicas que incluye ambas formas de elaborar el susodicho polvo.

El proceso de preparación de materia prima por vía húmeda conlleva importantes ventajas técnicas, por esta razón, alrededor del 96% de las baldosas fabricadas en España son con adición de agua en la etapa de molienda, es decir, mediante la vía húmeda. Por contra, esta opción supone un elevado coste energético a causa de la demanda calórica de los gases de secado de la etapa de atomización, aunque

muchas empresas aumentan la rentabilidad de dicha operación con la implantación de turbinas de cogeneración que aprovechen el calor de los gases para generar electricidad (véase la Figura 4).

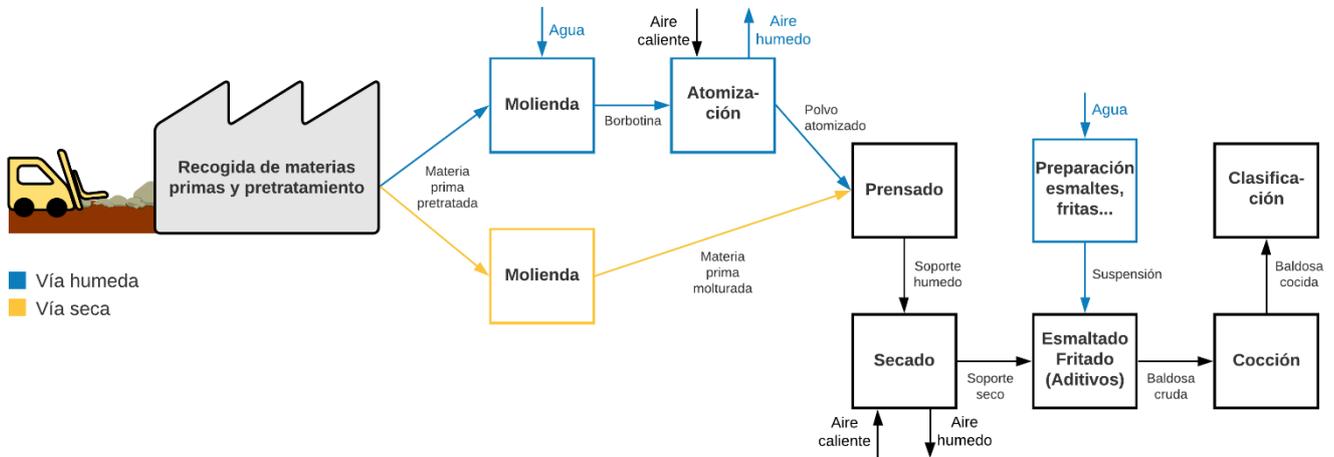


Figura 3: Diagrama del proceso de producción de baldosas cerámicas.

En el proceso de molienda por vía húmeda, la única alternativa de las empresas para reducir el consumo hídrico es la optimización de recursos y la economía circular. Para ello, es necesario estudiar cual es exactamente el papel del agua a lo largo de la línea de producción realizando un seguimiento desde que entra hasta que sale del proceso. Con esta intención, se encuentra que el agua realiza tres funciones básicas en el proceso de producción de baldosas:

1) Agua como materia prima:

En las primeras operaciones del proceso, el agua es introducida en el molino junto con las materias primas del soporte extraídos en la actividad minera. Una vez acaba la molturación, el nombre que recibe la suspensión es barbotina. Para eliminar el agua de esta barbotina, la mezcla es llevada a la unidad de secado por atomización donde es pulverizada en una cámara por la que se hacen circular gases suficientemente calientes y veloces para evaporar gran parte del agua y arrastrar el vapor generado consigo. De esta forma, los sólidos quedan separados del agua que es expulsada por las chimeneas en forma de vapor junto con el resto de los gases. Esta parte del proceso se encuentra descrita en la Figura 4.

La preparación de esmaltes también se lleva a cabo mediante un proceso de molienda por vía húmeda. Cabe decir que el agua utilizada en estos casos también es emitida a la atmosfera en forma de vapor durante la operación de cocción o alguna otra operación de secado anterior o posterior que implique directa o indirectamente una transmisión de calor suficiente para conseguir evaporar esta agua.

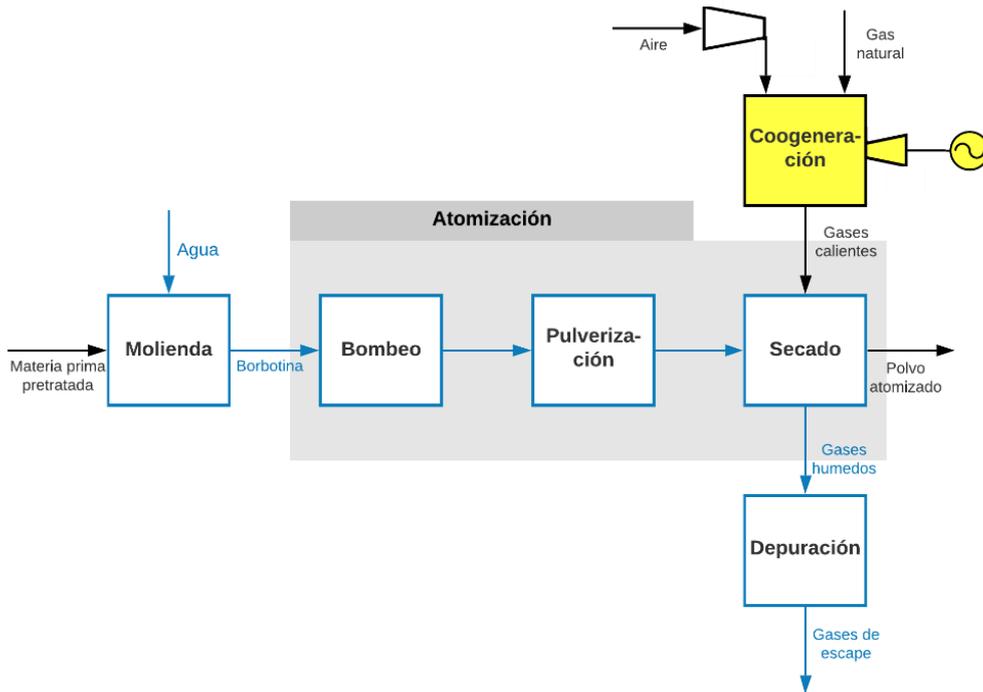


Figura 4: Diagrama de una unidad de atomización.

Aunque en la Tabla 3 se puede ver una aproximación del consumo, la calidad y procedencia del agua utilizada puede ser de diversa naturaleza en función del objetivo exacto.

Tabla 3: Consumo medio aproximado de agua por superficie de baldosa cerámica fabricada.

Actividad	Consumo (L/m ²)	Calidad
<i>Preparación de materias primas del soporte</i>	8 – 12	Media/Baja
<i>Preparación de esmaltes</i>	1 – 2	Alta

En la preparación de la materia prima del soporte, el agua puede proceder, o bien de aguas residuales industriales de otras etapas del proceso de producción de baldosas, o bien puede tratarse de agua limpia, ya sea de red pública o de un depósito o pozo privado de la empresa. Además, la calidad umbral del agua para conseguir polvo atomizado de coloración blanca es más alta que para obtener polvo de coloración roja y, por lo tanto, el volumen de agua residual aprovechable es menor en el caso de la coloración blanca a no ser que se lleve a cabo una depuración anterior. Si, en cambio, el producto deseado es polvo atomizado para baldosas que no van a ser esmaltadas, la calidad del agua debe ser todavía más alta y probablemente ni si quiera admita la posibilidad de reutilización de agua residual.

Para el caso de agua para elaboración de esmaltes u otros aditivos sí es necesaria agua completamente limpia por las exigencias del proceso, ya sea de red pública o de pozo privado.

Toda el agua utilizada como materia prima se evapora durante las etapas de secado y cocción así que no conlleva un problema de aguas residuales.

2) Agua como agente de lavado.

Tanto el subproceso de obtención de polvo atomizado, como el de preparación y aplicación de esmaltes requieren la limpieza manual de muchas de sus unidades. De hecho, la limpieza de la maquinaria implicada en la preparación y aplicación de esmaltes u otros acabados estéticos, es la operación que más agua residual genera con diferencia en el sector cerámico.

Se utiliza agua para limpiar las instalaciones, sobre todo las unidades de preparación de materias primas, los moldes y otras unidades de moldeo, líneas de esmaltado y engobe, así como otras unidades de decoración. Mientras que el agua de lavado de los molinos puede reutilizarse en la misma producción de polvo cerámico, en otras maniobras de limpieza como la de maquinaria en contacto directo con esmaltes u otros aditivos, el agua de lavado debe ser siempre limpia para aportar suficiente calidad. Una aproximación del agua utilizada en lavados podría ser la descrita a continuación (G. Benveniste, 2011):

- En dispositivos de preparación de composiciones para el soporte (vía húmeda): $1 - 2 L/m^2$.
- En dispositivos de preparación y aplicación de esmaltes y aditivos: $4 - 12 L/m^2$.

Se puede reducir el consumo de agua si esta se trata y se reutiliza varias veces en la limpieza.

3) Agua como fluido de intercambio de calor y depuración de efluentes gaseosos.

Por último, el agua también es un recurso útil para el intercambio de calor en actividades de refrigeración y en absorción de contaminantes de las corrientes gaseosas.

En el caso de uso de agua como fluido de intercambio de calor, se trata de la incorporación de agua en los circuitos hidráulicos cerrados de refrigeración y en los compresores, entre otras unidades. El agua utilizada debe estar limpia y presentar baja dureza para evitar incrustaciones. A medida que transcurren las recirculaciones, se hace necesaria una corriente de purga debido a las elevadas concentraciones de ciertos contaminantes. El caso más alarmante es la purga del circuito de refrigeración del fritado de vidriados cerámicos ya que se pueden encontrar concentraciones de boro que superan más de 20 veces el límite legal de vertido. También en las aguas de purga procedentes de la etapa de pulido y biselado se pueden encontrar conductividades muy elevadas a consecuencia de la fricción y el desgaste de las muelas y las baldosas.

Por último, el agua también se puede utilizar para retener partículas en sistemas de depuración de gases en la chimenea de la etapa de atomización. La procedencia de esta agua puede ser íntegramente residual siempre y cuando haya sido suficientemente clarificada.

En conclusión, la aportación de agua residual por parte del proceso de producción es nula debido a que el agua es evaporada y emitida a la atmosfera durante las etapas de secado y cocción, así que las operaciones de limpieza de las unidades de preparación de materias primas y las de esmaltado, así como las unidades de desecación con prensas de filtro y filtros de rotación y las unidades de desbastado por vía húmeda son las responsables de la mayoría del agua residual generada. Cabe añadir que las aguas de depuración de gases, y las purgas de los sistemas de refrigeración, a pesar de existir, no generan una cantidad comparable de agua residual a la originada en las actividades de limpieza o lavado, suspensión de los materiales arcillosos y la limpieza de los equipos, aunque si se debe de tener presente su aporte.

A pesar de que la composición del agua residual entre distintas empresas del sector cerámico puede variar, lo más común es encontrar un agua turbia y con coloración debido a las partículas finas de minerales del esmalte y de arcilla en suspensión, la composición química presenta las siguientes características:

- Sólidos en suspensión como arcillas, restos de fritas y esmaltes, silicatos u otros compuestos insolubles.
- Aniones y cationes en disolución como sulfatos (SO_4^-), cloruros (Cl^-), fluoruros (F^-), sodio (Na^+), magnesio (Mg^{2+}) o calcio (Ca^{2+}).
- Metales pesados en disolución y/o suspensión, principalmente derivados del plomo y el zinc.
- Compuestos de boro en pequeñas cantidades.
- Trazas de materia orgánica procedentes de vehículos serigráficos, colas, tintas u otros compuestos orgánicos utilizados en el proceso decorativo.

Para más detalle, en la Tabla 4 se indica la composición promedio del agua residual industrial de una planta de fabricación de baldosas cerámicas.

Tabla 4: Análisis químico promedio de las aguas residuales industriales sin depurar de una empresa productora de baldosas cerámicas.
(Comisión Europea, 2011)

Parámetro	Intervalo	Parámetro	Intervalo
pH	7 – 9	Calcio (mg/L)	5 – 500
Sólidos en suspensión (mg/L)	1000 – 20000	Boro (mg/L)	1 – 60
Sólidos sedimentables (mg/L)	5 – 30	Plomo (mg/L)	< 5
DQO (mg O ₂ /L)	100 – 400	Sodio (mg/L)	50 – 500
DBO ₅ (mg O ₂ /L)	40 – 60	Potasio (mg/L)	1 – 50
Fluoruros (mg/L)	< 2	Silicio (mg/L)	5 – 30
Cloruros (mg/L)	300 – 700	Aluminio (mg/L)	< 2
Sulfatos (mg/L)	100 – 1000	Hierro (mg/L)	< 0,5
Magnesio (mg/L)	10 – 100	Zinc (mg/L)	< 2

5.3. Depuración del agua residual en el sector cerámico

Debido al alto consumo de agua en la industria, tanto en la línea de producción como en otros procesos paralelos, las plantas cerámicas generan agua residual que debe ser debidamente depurada para ser vertida o aprovechable en otra labor. Por ello, muchas empresas acaban optando por construir una planta depuradora en su ubicación para así evitar depender de empresas externas especializadas y ahorrar los gastos derivados de delegar en otra empresa el tratamiento de sus vertidos. Esta práctica es bastante habitual en las empresas dedicadas a la producción de baldosas cerámicas.

Si las aguas residuales se reutilizan en el proceso de fabricación del soporte, en principio, no es necesario tratamiento alguno, pero sí se necesitará una homogeneización que garantice la constancia en sus características, aun así, se acaba depurando en muchos casos con un tratamiento fisicoquímico para eliminar los sólidos y evitar obturaciones o sedimentaciones. Si el agua, en cambio, se reutiliza para la limpieza de las instalaciones, su calidad debe ser mayor, de manera que se requiere al menos un tratamiento fisicoquímico.

Con el objetivo de optimizar el consumo de agua y minimizar el coste económico de incorporar agua limpia nueva a la planta, el agua tratada se suele reutilizar en circuitos cerrados. Para conocer la cantidad máxima de aguas residuales reutilizables en la planta se puede diseñar un balance hídrico que

determine las cantidades generadas y vertidas en todos los puntos de la empresa. En la Figura 5 se puede observar las corrientes a tener en cuenta en un balance hídrico general.

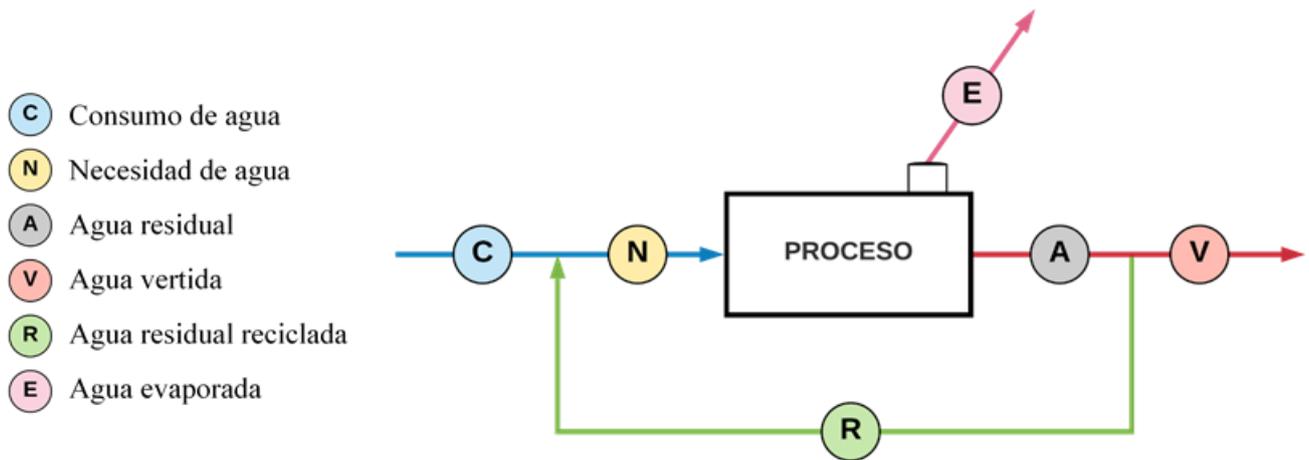


Figura 5: Corrientes de un balance hídrico general.

En este contexto, la Tabla 5 muestra los índices de reciclado de aguas residuales del proceso de fabricación que pueden alcanzarse en los diferentes sectores de la industria cerámica.

Tabla 5: Índices de reciclado de aguas residuales del proceso de fabricación que se alcanzan en diferentes sectores de la industria cerámica. (Comisión Europea, 2011)

Sector	Promedio	Índice más alto
Baldosas cerámicas	70 – 80%	100%
Vajillas	n/d	50%
Cerámica sanitaria	30 – 50%	50%

En el caso de la industria de producción de baldosas cerámicas, si la planta dispone de las operaciones de atomización para fabricar el polvo granulado que se utiliza como materia prima para el soporte cerámico, prácticamente no se tiene que verter nada de agua residual. Esto es debido a que el agua residual se puede reutilizar en la fabricación de este polvo de manera que la mayoría del agua residual acaba siendo evaporada. Aun así, utilizar esta agua puede alterar la composición de los materiales por lo que se debe extremar la precaución al utilizarlas para obtener según qué productos. En la Figura 6 se encuentra un balance hídrico representativo de estas empresas.

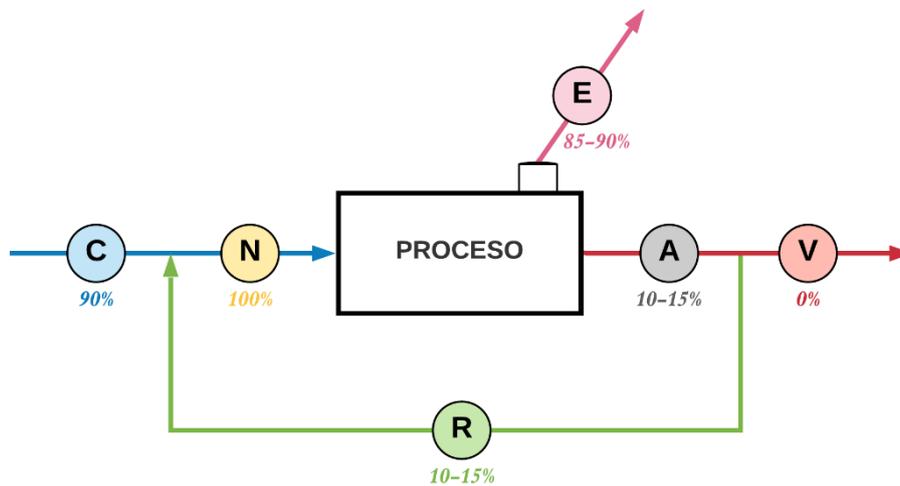


Figura 6: Balance hídrico representativo de una empresa productora de baldosas cerámicas con operación de atomización (vertido cero).

En el caso de una empresa que no disponga de operaciones de preparación de materia prima y, por lo tanto, no pueda reutilizar el agua residual en esta actividad, no se puede conseguir alcanzar el vertido cero. Además, si en dicho caso no se va eliminando en una purga parte de esa agua residual, al reciclarla continuamente al proceso, la concentración en componentes va en aumento. Por esta razón es necesario incorporar una purga que elimine sobre el 20% del agua residual mediante vertidos. Estas aguas residuales excedentes precisan normalmente de la combinación de homogeneización, floculación, sedimentación y filtración para poder ser vertidas. En la Figura 7 se encuentra un balance hídrico representativo de una empresa productora de baldosas que no cuenta con la etapa de fabricación del polvo cerámico.

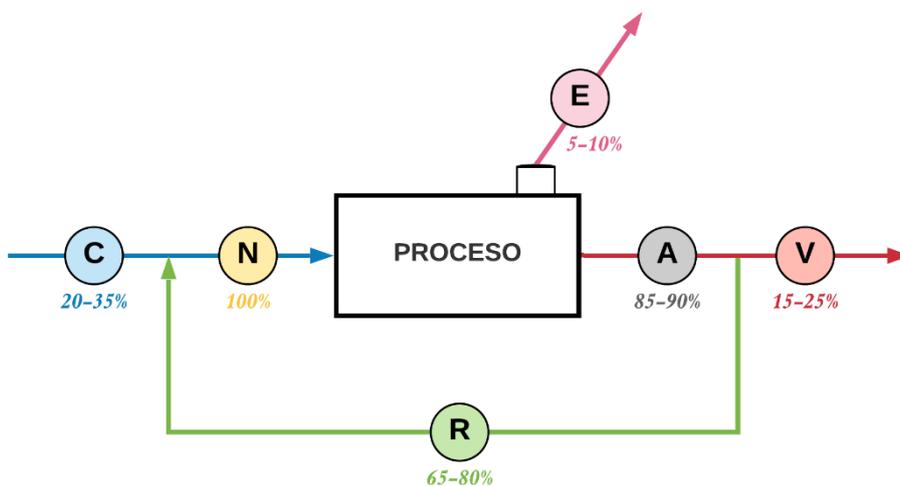


Figura 7: Balance hídrico representativo de una empresa productora de baldosas cerámicas sin operación de atomización.

Actualmente, muchas de las empresas que pertenecen a este segundo caso, al no disponer de una depuradora en su planta se ven obligadas a transportar ese excedente de agua residual en camiones cisterna para que una empresa externa las gestione. Muchas de las que si disponen de una planta de

depuración, una vez tratada el agua, la envían a las empresas proveedoras de su granulado atomizado para que la reutilicen como agua de molienda. Esta mecánica es viable siempre y cuando la distancia entre ambas empresas no suponga un sobrecoste.

Aunque las empresas que incorporan una planta de estas características no suelen necesitar una depuración tan exhaustiva como la que se lleva a cabo en una EDAR convencional, a continuación, se examinan en detalle los cuatro tipos de tratamientos o etapas de la llamada “línea de aguas” de una EDAR para comprender el propósito de cada una de estas fases y así discernir cuales serán potencialmente necesarias en el caso que concierne a este proyecto. En la Figura 8 se puede observar la estructura simplificada de una EDAR con las diferentes etapas descritas.

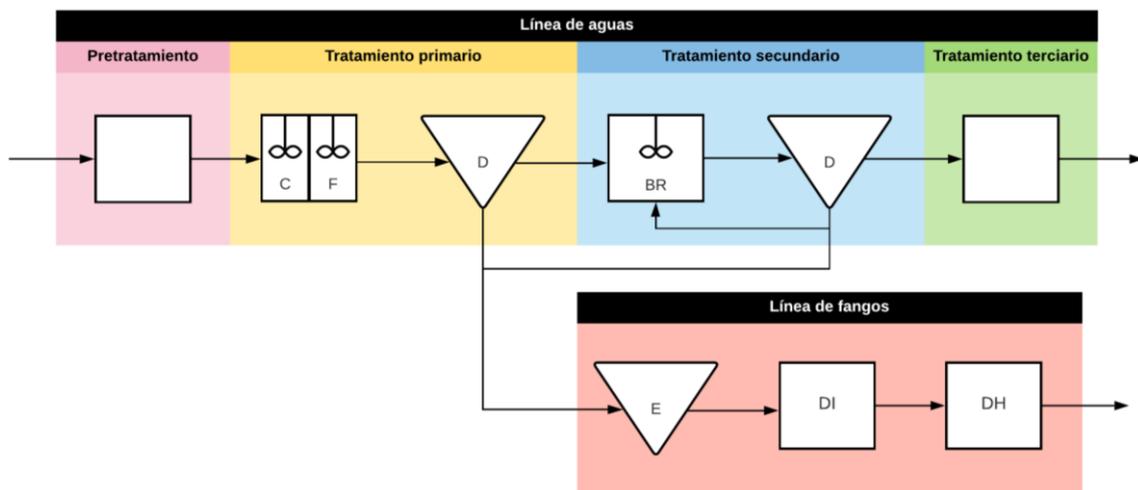


Figura 8: Representación general de las etapas de una EDAR.

- **Pretratamiento:**

Se lleva a cabo para extraer arenas, aceites no solubles, grasas, los sólidos más grandes y los compuestos tóxicos o no biodegradables que pueden afectar a los tratamientos posteriores. Normalmente, todas las operaciones son de origen físico y sin adición de químicos. Las más comunes son el desbaste mediante rejas o tamices estáticos o móviles, la homogeneización, el mezclado, la aireación, la sedimentación o la flotación. También pueden incorporarse otras operaciones como la neutralización, la precipitación de metales, la filtración o la adsorción, aunque estas pueden ubicarse en otras etapas posteriores en función de la naturaleza del agua a tratar.

- **Tratamiento primario:**

Consiste en la eliminación de sólidos en suspensión mediante un mecanismo fisicoquímico. Primero se realiza una coagulación y floculación de los sólidos en suspensión que no sedimentan de forma discreta y, a continuación, se eliminan mediante una operación de decantación.

- **Tratamiento secundario:**

Se trata de un tratamiento biológico en el que la materia orgánica biodegradable y los nutrientes disueltos se eliminan mediante la acción de microorganismos en diversos biorreactores y una posterior decantación. Sin embargo, para muchos propósitos, se necesita una mayor purificación para satisfacer las estrictas regulaciones de efluentes y, por ello, es necesario proceder a una última etapa de tratamiento.

- **Tratamiento terciario:**

Este tratamiento final realiza una eliminación más selectiva de compuestos inorgánicos y/o orgánicos concretos. Operaciones habituales son la adsorción, los procesos con membranas, la desinfección con radiación ultravioleta, la oxidación o la cloración.

Además de estas etapas, en la llamada “línea de fangos”, se tratan los residuos sólidos extraídos en las operaciones de decantación. Esta segunda línea es importante sobre todo cuando existe una carga orgánica alta. Algunas operaciones habituales para reducir el volumen que ocupan los fangos y eliminar los patógenos que ocasionan fermentación o putrefacción son la estabilización, el espesado, la digestión o la deshidratación.

Una vez diferenciadas y descritas las partes generales de un proceso de depuración de aguas residuales, es hora de inspeccionar la estructura y eficiencia de una planta tradicional de depuración de una empresa productora de baldosas cerámicas:

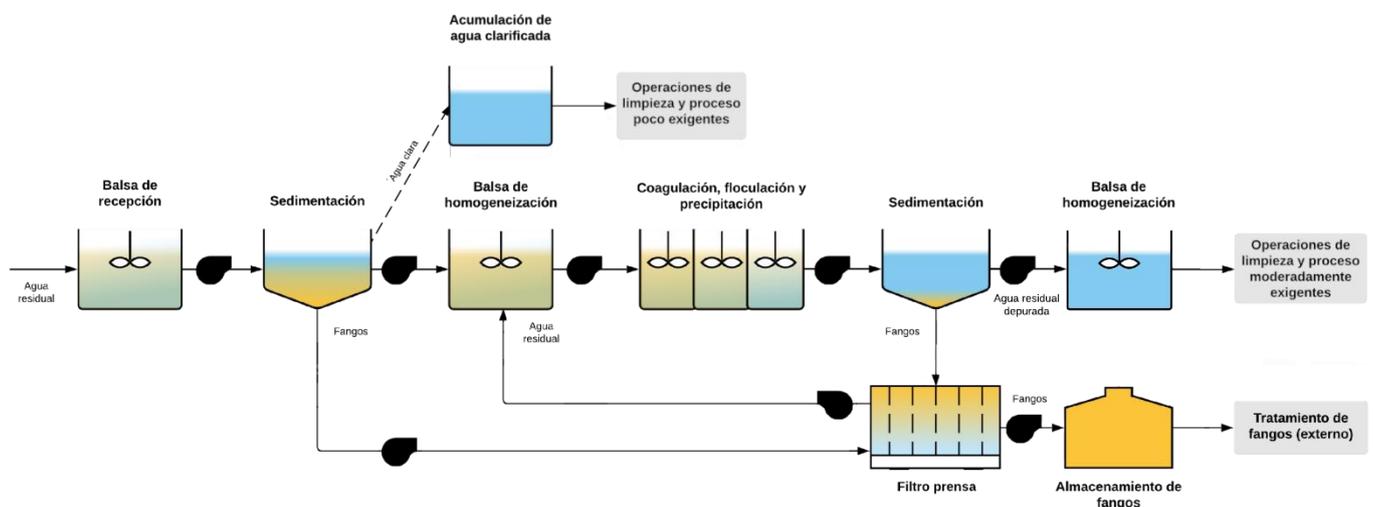


Figura 9: Diagrama de una planta de tratamiento de agua residual tradicional en una empresa productora de baldosas cerámicas.

Como se puede ver en la Figura 9, el modelo tradicional del tratamiento de aguas residuales llevado a cabo en una empresa productora de baldosas cerámicas suele consistir en un pretratamiento y un tratamiento primario clásico.

Para empezar, todas las aguas residuales son conducidas a una balsa de recepción mediante canaletas y colectores para llevar a cabo una homogeneización primaria para conseguir, en la medida de lo

posible, eliminar los problemas relativos a las variaciones en los componentes y facilitar el control de las adiciones posteriores de productos. A continuación, aunque en algunas empresas esta etapa no existe, se lleva a cabo una primera decantación para eliminar los sólidos más grandes. Como ya se ha indicado anteriormente, el agua residual simplemente clarificada puede ser útil para ciertas operaciones y, por ello, algunas empresas no llevan a cabo la depuración de la totalidad del agua residual y la detienen en este punto, aunque el tratamiento sea de muy baja calidad. Seguidamente de esta primera sedimentación, se incluye una balsa de homogeneización que además se ocupa de regular la alimentación a las posteriores operaciones. Habitualmente en las balsas de homogeneización se incluye una aireación con el propósito de oxigenar los compuestos orgánicos para evitar malos olores, oxidar materiales y mejorar la posterior floculación. Esta aireación se lleva a cabo mediante agitadores superficiales o difusores de burbuja.

Después de estas operaciones de pretratamiento, el agua es canalizada a tres reactores en serie. En el primero se procede la coagulación de las partículas suspendidas para favorecer la aglomeración de estas, en el segundo se lleva a cabo una neutralización para regular el aumento de la acidez que produce el coagulante y, en el tercer y último reactor, se añade el floculante que ayuda a agrupar los sólidos para favorecer su sedimentación. Finalmente, la corriente de agua accede a una decantación por gravedad en la que se eliminan los sólidos químicamente tratados a lo largo de los tres reactores.

Como en las empresas no se suele disponer de una línea de fangos, los fangos generados a lo largo de la depuración son filtrados, almacenados, transportados y tratados más tarde por empresas externas o reutilizados como materia prima para el soporte cerámico.

A pesar de conseguir una eliminación excelente de sólidos en suspensión, en la mayoría de los casos esta depuración no es suficientemente efectiva para otros contaminantes, sobre todo cuando las corrientes de agua contienen compuestos orgánicos no biodegradables, iones monovalentes y bivalentes, compuestos de boro, cloruros o sulfatos (estos componentes son habituales en aguas de estas características como se puede ver en la Tabla 4). Debido a esta deficiente depuración, la reutilización de las aguas depuradas se ve restringida solo a la preparación de suspensiones cerámicas para la obtención de polvo atomizado y las operaciones de limpieza que no requieran mucha calidad. Además, teniendo en cuenta los valores legales de vertido a cauce público (véase la Tabla 6), la opción de verter el agua al alcantarillado y, sobre todo, a cauce público suele estar limitada por no alcanzarse estos mínimos legales.

Tabla 6: Valores límite de vertido a cauce público según datos de EPSAR y una EDAR ubicada en Castellón. (EPSAR, 2021)

Parámetro	VLE	Parámetro	VLE
<i>pH</i>	5,5 – 9,5	Nitratos (<i>mg/L</i>)	11
Sólidos en suspensión (<i>mg/L</i>)	35	Aceites y grasas (<i>mg/L</i>)	10
Temperatura (°C)	< 25	Tensoactivos aniónicos (<i>mg/L</i>)	2
<i>DQO</i> (<i>mg O₂/L</i>)	125	Cobre (<i>μg/L</i>)	120
<i>DBO</i> (<i>mg O₂/L</i>)	25	Cromo (<i>μg/L</i>)	50
Fluoruros (<i>mg/L</i>)	< 2	Mercurio (<i>μg/L</i>)	0,05
Cloruros (<i>mg/L</i>)	300	Níquel (<i>μg/L</i>)	20
Sulfatos (<i>mg/L</i>)	360	Plomo (<i>μg/L</i>)	7,2
Fósforo total (<i>mg/L</i>)	8	Zinc (<i>μg/L</i>)	500
Amonio total (<i>mg/L</i>)	7	Boro (<i>mg/L</i>)	2

Puesto que el agua residual necesita un tratamiento más exhaustivo y las empresas cerámicas generalmente no disponen de operaciones de depuración más allá de un tratamiento primario básico, estos negocios se ven forzados a depender de una empresa externa especializada que lleve a cabo la depuración, perdiendo así recursos económicos y, si no se dispone de una red directa para trasladar el agua, produciendo un impacto ambiental más al tener que transportar el agua en camiones cisterna hasta el lugar de destino.

5.3.1. Regulación de la reutilización de aguas depuradas

El Real Decreto 1620/2007, de 7 de diciembre, por el que se establece el régimen jurídico de la reutilización de las aguas depuradas determina las características que debe tener un agua residual depurada que se va a reutilizar de nuevo en una operación. A continuación, en la Tabla 7 se incluyen todos los límites máximos admisibles sesgados por sector para reutilizar el agua residual.

Tabla 7: Limitaciones en las características del agua depurada para su reutilización según el Real Decreto 1620/2007.

Uso previsto del agua	Valor máximo admisible (VMA)				
	Nemátodos intestinales	Escherichia coli	Sólidos en suspensión	Turbidez	Otros criterios
1.-Usos urbanos					
<p>CALIDAD 1.1: RESIDENCIAL</p> <p>a) Riego de jardines privados. b) Descarga de aparatos sanitarios.</p>	1 huevo /10 L	0 UFC /100 mL	10 mg/L	2 UNT	<p>OTROS CONTAMINANTES contenidos en la autorización de vertido aguas residuales: se deberá limitar la entrada de estos contaminantes al medio ambiente. En el caso de que se trate de sustancias peligrosas deberá asegurarse el respeto de las NCAs.</p> <p>Legionella spp. 100 UFC/L (si existe riesgo de aerosolización).</p>
<p>CALIDAD 1.2: SERVICIOS</p> <p>a) Riego de zonas verdes urbanas (parques, campos deportivos y similares). b) Baldeo de calles. c) Sistemas contra incendios. d) Lavado industrial de vehículos.</p>	1 huevo /10 L	200 UFC /100 mL	20 mg/L	10 UNT	
2.-Usos agrícolas¹					
<p>CALIDAD 2.12:</p> <p>a) Riego de cultivos con sistema de aplicación del agua que permita el contacto directo del agua regenerada con las partes comestibles para alimentación humana en fresco.</p>	1 huevo /10 L	100 UFC /100 mL	20 mg/L	10 UNT	<p>OTROS CONTAMINANTES Contenidos en la autorización de vertido de aguas residuales: se deberá limitar la entrada de estos contaminantes al medio ambiente. En el caso de que se trate de sustancias peligrosas deberá asegurarse el respeto de las NCAs.</p> <p>Legionella spp. 1000 UFC/L (si existe riesgo de aerosolización).</p> <p>Es obligatorio llevar a cabo la detección de patógenos Presencia/Ausencia (Salmonella, etc.) cuando se repita habitualmente que c=3 para M=1.000.</p>
<p>CALIDAD 2.2:</p> <p>a) Riego de productos para consumo humano con sistema de aplicación de agua que no evita el contacto directo del agua regenerada con las partes comestibles, pero el consumo no es en fresco sino con un tratamiento industrial posterior. b) Riego de pastos para consumo de animales productores de leche o carne. c) Acuicultura.</p>	1 huevo /10 L	1000 UFC /100 mL	35 mg/L	–	<p>OTROS CONTAMINANTES Contenidos en la autorización de vertido de aguas residuales: se deberá limitar la entrada de estos contaminantes al medio ambiente. En el caso de que se trate de sustancias peligrosas deberá asegurarse el respeto de las NCAs.</p> <p>Taenia saginata y Taenia solium: 1 huevo/L (si se riegan pastos para consumo de animales productores de carne).</p> <p>Es obligatorio llevar a cabo detección de patógenos Presencia/Ausencia (Salmonella, etc.) cuando se repita habitualmente que c=3 para M=10000.</p>
<p>CALIDAD 2.3:</p> <p>a) Riego localizado de cultivos leñosos que impida el contacto del agua regenerada con los frutos</p>	1 huevo /10 L	10000 UFC /100 mL	35 mg/L	–	<p>OTROS CONTAMINANTES Contenidos en la autorización de vertido de aguas residuales: se deberá limitar la entrada de estos contaminantes al medio ambiente. En el caso de que se trate de sustancias peligrosas deberá asegurarse el respeto de las NCAs.</p>

<p>consumidos en la alimentación humana.</p> <p>b) Riego de cultivos de flores ornamentales, viveros, invernaderos sin contacto directo del agua regenerada con las producciones.</p> <p>c) Riego de cultivos industriales no alimentarios, viveros, forrajes ensilados, cereales y semillas oleaginosas.</p>					<p>Legionella spp. 100 UFC/L.</p>
3.-Usos industriales					
<p>CALIDAD 3.1:</p> <p>a) Aguas de proceso y limpieza excepto en la industria alimentaria.</p> <p>b) Otros usos industriales.</p>	-	10000 UFC /100 mL	35 mg/L	15 UNT	<p>OTROS CONTAMINANTES Contenidos en la autorización de vertido de aguas residuales: se deberá limitar la entrada de estos contaminantes al medio ambiente. En el caso de que se trate de sustancias peligrosas deberá asegurarse el respeto de las NCAs.</p> <p>Legionella spp. 100 UFC/L.</p>
<p>c) Aguas de proceso y limpieza para uso en la industria alimentaria.</p>	1 huevo /10 L	1000 UFC /100 mL	35 mg/L	-	<p>OTROS CONTAMINANTES Contenidos en la autorización de vertido de aguas residuales: se deberá limitar la entrada de estos contaminantes al medio ambiente. En el caso de que se trate de sustancias peligrosas deberá asegurarse el respeto de las NCAs.</p> <p>Legionella spp. 100 UFC/L.</p> <p>Es obligatorio llevar a cabo detección de patógenos Presencia/Ausencia (Salmonella, etc.) cuando se repita habitualmente que c=3 para M=10000.</p>
<p>CALIDAD 3.2:</p> <p>a) Torres de refrigeración y condensadores evaporativos.</p>	1 huevo /10 L	0 UFC / 100 mL	5 mg/L	1 UNT	<p>Legionella spp. 0 UFC/L.</p> <p>Para su autorización se requerirá:</p> <ul style="list-style-type: none"> • La aprobación, por la autoridad sanitaria, del Programa específico de control de las instalaciones contemplado en el Real Decreto 865/2003, de 4 de julio, por el que se establecen los criterios higiénico-sanitarios para la prevención y control de la legionelosis. • Uso exclusivamente industrial y en localizaciones que no estén ubicadas en zonas urbanas ni cerca de lugares con actividad pública o comercial.
4.-Usos recreativos					
<p>CALIDAD 4.1:</p> <p>a) Riego de campos de golf.</p>	1 huevo /10 L	200 UFC /100 mL	20 mg/L	10 UNT	<p>OTROS CONTAMINANTES Contenidos en la autorización de vertido de aguas residuales: se deberá limitar la entrada de estos contaminantes al medio ambiente. En el caso de que se trate de sustancias peligrosas deberá asegurarse el respeto de las NCAs.</p> <p>Si el riego se aplica directamente a la zona del suelo (goteo, microaspersión) se fijan los criterios del grupo de Calidad 2.3.</p> <p>Legionella spp. 100 UFC/L (si existe riesgo de aerosolización).</p>
<p>CALIDAD 4.2:</p> <p>a) Estanques, masas de agua y caudales circulantes ornamentales, en los que</p>	-	10000 UFC /100 mL	35 mg/L	-	<p>OTROS CONTAMINANTES Contenidos en la autorización de vertido de aguas residuales: se deberá limitar la entrada de estos contaminantes al medio ambiente. En el caso de que se trate de sustancias peligrosas deberá asegurarse el respeto de las NCAs.</p>

está impedido el acceso del público al agua.					$P_T: 2 \text{ mg P/L}$ (en agua estancada).
5.-Usos ambientales					
CALIDAD 5.1: a) Recarga de acuíferos por percolación localizada a través del terreno.	–	1000 UFC /100 mL	35 mg/L	–	$N_T: 10 \text{ mg N/L}$ $NO_3: 25 \text{ mg NO}_3/L$
CALIDAD 5.2: a) Recarga de acuíferos por inyección directa.	1 huevo /10 L	0 UFC /100 mL	10 mg/L	2 UNT	Art. 257 a 259 del RD 849/1986.
CALIDAD 5.3: a) Riego de bosques, zonas verdes y de otro tipo no accesibles al público. b) Silvicultura.	–	–	35 mg/L	–	OTROS CONTAMINANTES Contenidos en la autorización de vertido de aguas residuales: se deberá limitar la entrada de estos contaminantes al medio ambiente. En el caso de que se trate de sustancias peligrosas deberá asegurarse el respeto de las NCAs.
CALIDAD 5.4: a) Otros usos ambientales (mantenimiento de humedales, caudales mínimos y similares).	La calidad mínima requerida se estudiará caso por caso.				

¹⁾ Características del agua regenerada que requieren información adicional: Conductividad 3,0 dS/m ; Relación de Adsorción de Sodio (RAS): 6 meq/L; Boro: 0,5 mg/L; Arsénico: 0,1 mg/L; Berilio: 0,1 mg/L; Cadmio: 0,01 mg/L; Cobalto: 0,05 mg/L; Cromo: 0,1 mg/L; Cobre: 0,2 mg/L; Manganeso: 0,2 mg/L; Molibdeno: 0,01 mg/L; Níquel: 0,2 mg/L; Selenio : 0,02 mg/L; Vanadio: 0,1 mg/L.

En conclusión, como se puede consultar en la anterior tabla, el agua residual depurada que se reutiliza en el sector cerámico pertenece habitualmente a la categoría CALIDAD 3.1 a) Aguas de proceso y limpieza excepto en la industria alimentaria. Para este caso, con el tratamiento tradicional descrito se cumplen los requisitos necesarios y, generalmente, no es necesario incorporar más operaciones de depuración del agua residual. No obstante, como ya se ha indicado antes, las empresas que no disponen de planta de producción de polvo cerámico no pueden recircular la totalidad del agua residual producida a causa de que, al reciclar continuamente la misma agua, su calidad es cada vez peor en cada iteración por el aumento en la concentración de contaminantes (como, por ejemplo, el boro). Por esta razón es obligatorio verter un excedente de las aguas residuales producidas. Para verter estos excedentes, al no cumplir habitualmente los valores límite de vertido por las limitaciones de la depuración fisicoquímica, la opción habitual es su traslado en camiones cuba hasta una planta de fabricación de polvo atomizado, siendo así necesario delegar la gestión hidráulica a otra empresa.

5.4. El boro y sus compuestos

Debido a que el boro y sus compuestos son contaminantes que dan problemas en la depuración de aguas residuales del sector de fabricación de baldosas, este proyecto se centra en su eliminación o, al menos, en reducir su concentración por debajo de los límites legales de vertido. Para este objetivo se propone un modelo de depuración diferente al tradicional con la incorporación de un tratamiento terciario dedicado a la extracción del boro de las corrientes de agua residual, pero antes de desarrollar este plan, se explorarán más profundamente las características de este elemento y su eliminación.

El boro (*B*) es un metaloide que figura como quinto elemento de la tabla periódica con una masa atómica de 10,81 *u*. Por su capacidad de formar poliestructuras y su bajo coeficiente de dilatación térmica, este elemento y sus compuestos son utilizados para la fabricación de esmaltes vidriados en la industria cerámica y, como consecuencia de su alta solubilidad, pasan fácilmente a las aguas residuales. Esta alta solubilidad es la causa principal de su difícil depuración.

El boro elemental puede existir a temperatura ambiente en forma de cristales monoclinicos negros o en forma de polvo amorfo de coloración amarillenta o marrón cuando es impuro. La obtención de boro de alta pureza es una tarea difícil debido a su densidad (2,37 *g/m*³) y sus altos puntos de fusión y de ebullición (2079 °C y 2550 °C respectivamente, aunque pueden ser mayores en algunas variedades alotrópicas del boro cristalino).

La estructura electrónica del boro ($1s^2 2s^2 2p^1$) le permite asimilar tres o cuatro enlaces de valencia. En los compuestos más comunes como los óxidos, los sulfuros, los nitruros y los haluros, el boro presenta un estado de oxidación de +3 y enlaces coplanares de 120°. Los estados de oxidación inferiores +1 o 0 solo aparecen en algunos compuestos artificiales minoritarios como los boranos superiores (por ejemplo, B_5H_9), los haluros subvalentes (por ejemplo, B_4Cl_4), los boruros metálicos (por ejemplo, Ti_2B) o algunos compuestos que contienen múltiples enlaces *B – B*. En la naturaleza, el boro suele tener número de coordinación de 3 o 4 y también presenta una buena afinidad con el oxígeno, permitiendo una buena base para la formación de boratos y oxocomplejos.

5.4.1. Distribución del boro en el planeta

Cabe señalar que el boro elemental nunca se encuentra libre en la naturaleza, sino que se presenta habitualmente como óxido de boro (B_2O_3) combinado con óxidos de otros elementos que forman boratos de mayor complejidad. En disolución acuosa es habitual encontrarlo en forma de ácido bórico ($B(OH)_3$) o de iones borato (BO_3^{3-} , $B(OH)_4^-$ u otros).

El primer compuesto conocido en la antigüedad es el tetraborato de sodio decahidratado o bórax ($Na_2B_4O_7 \cdot 10 H_2O$), sustancia útil para la fabricación de perborato de sodio ($NaBO_3$), un agente blanqueador que todavía se utiliza en los detergentes y productos de limpieza domésticos.

La aparición de depósitos de minerales de borato está íntimamente relacionada con la actividad volcánica pasada o presente y el clima árido es esencial para la conservación de dichos depósitos, mayoritariamente explotados en Turquía, Chile o China entre otros países.

A consecuencia de la lixiviación de rocas y suelos que contienen boratos y borosilicatos, también aparecen compuestos de boro en aguas subterráneas, aunque suele ser en menor cantidad. Aun así, gran parte del boro de la Tierra se encuentra en los océanos, con una concentración que oscila entre 0,5 y 9,6 mg/L. Por ejemplo, el mar Mediterráneo puede llegar a alcanzar los 9,6 mg/L.

En las aguas superficiales los márgenes suelen ser muy amplios debido a que depende de diversos factores antropogénicos (vertidos de la industria del vidrio, cerámica, metalurgia, así como drenaje en minas de carbón en desuso o vertederos de la industria minera) y naturales (meteorización de las rocas, lixiviación de los depósitos o lluvias en las zonas costeras). En las aguas superficiales de la UE oscila entre $< 0,001$ y 2 mg/L, mientras que en España destacan puntos en el levante como la cuenca del Júcar y del Segura debido a la alta cantidad de plantas cerámicas. Se debe prestar especial atención a los efluentes de las aguas residuales domésticas porque también pueden estar enriquecidos en boro debido a la presencia del perborato de sodio (blanqueador antes ya mencionado) puesto que el boro puede interferir en ciertos procesos de síntesis y descomposición biológica de las EDAR.

Los fertilizantes también pueden ser una fuente importante de boro antropogénico debido a que en muchos fertilizantes se incluye bórax por la naturaleza nutricional del boro para las plantas. No obstante, hay que mencionar que el boro puede convertirse en tóxico para las plantas cuando se sobrepasan ciertos límites. Algunos de los cultivos más sensibles a la presencia de boro son los cítricos y los kiwis, por esta razón no deben ser regados con aguas ricas en boro.

Los compuestos de boro más utilizados en la industria son los boratos y el ácido bórico ($B(OH)_3$), mientras que el bórax, la ulexita ($NaCaB_5O_9 \cdot 8 H_2O$), la colemanita ($Ca_2B_6O_{11} \cdot 5 H_2O$) y la kernita ($Na_2B_4O_7 \cdot 4 H_2O$) proporcionan la mayor parte de las materias primas para su producción. La demanda del boro es acaparada por la industria vidriera y cerámica mayoritariamente.

5.4.2. El boro en medio acuoso

En medio acuoso, como ya se ha indicado en el inicio del anterior punto, los compuestos de boro se presentan comúnmente en forma de ácido bórico ($B(OH)_3$ o H_3BO_3) y en iones borato, el más frecuente es el tetrahidroxiborato ($B(OH)_4^-$).

El ácido bórico, o ortobórico, se puede formar a partir del borax y la acción de un ácido inorgánico como el clorhídrico (HCl) o mediante hidrólisis de trihaluros de boro (BCl_3 , BBr_3 y BI_3) o de diborano (B_2H_6). Cristaliza en placas blancas, brillantes y cerosas, obsérvese un ejemplo en la Figura 10.

Es un ácido débil algo controvertido debido a que existen interpretaciones contradictorias sobre el origen de su acidez. Generalmente se acepta que se trata de un ácido de Lewis monobásico, sin embargo, su comportamiento en algunas reacciones químicas sugiere que también es un ácido poliprótico en el sentido de Brønsted-Lowry presentando varias constantes de disociación ácida, como se puede ver a continuación:

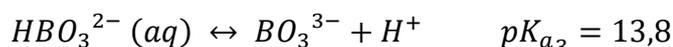
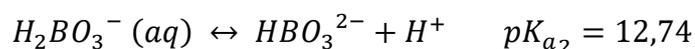
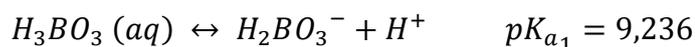


Figura 10: Escamas de ácido bórico.

Siguiendo esta interpretación teórica, el equilibrio de las reacciones químicas anteriores se puede desplazar en función del pH del agua de la manera que se puede ver en la Figura 11. La temperatura y la salinidad también son capaces de modificar el equilibrio, aunque en una menor medida.

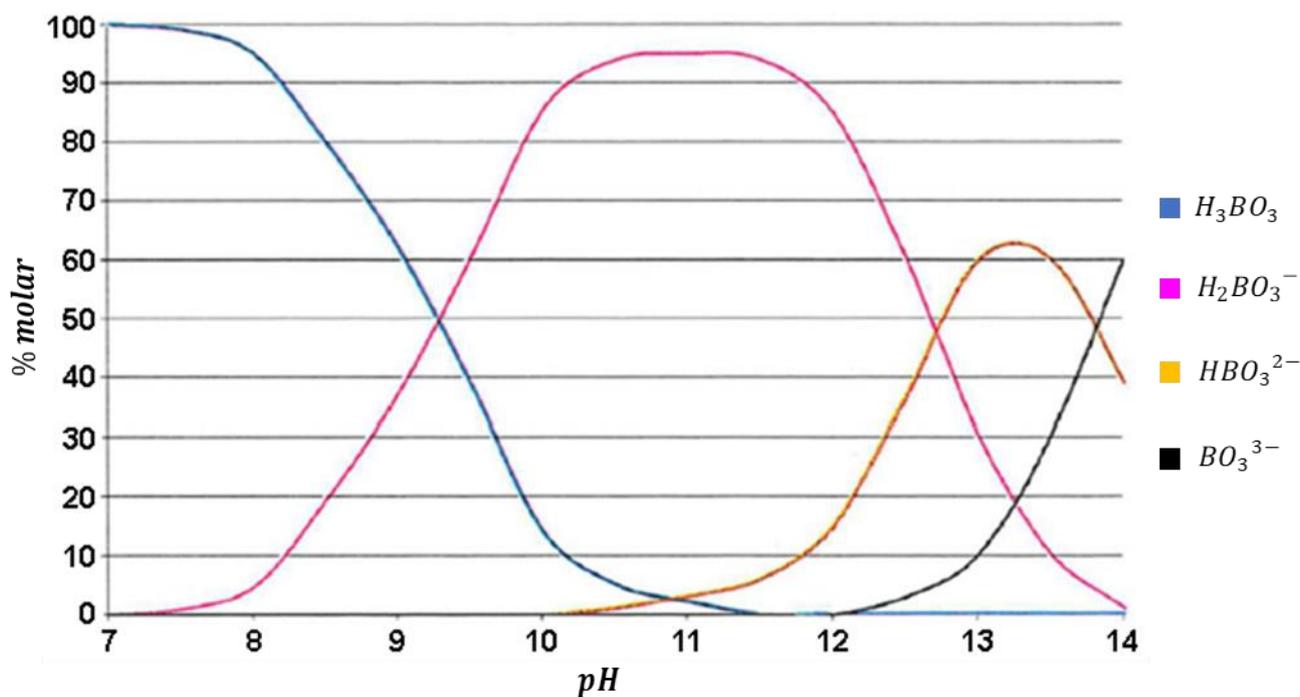
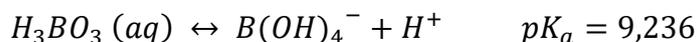


Figura 11: Distribución de los compuestos ácidos del boro en función del pH del agua (Interpretación de Brønsted-Lowry). (Moliner Salvador, 2017)

No obstante, basándose en los resultados de la espectroscopia Raman que muestra la presencia de iones $B(OH)_4^-$, muchos expertos concluyen que se trata de un ácido de Lewis que no se ioniza de forma normal, sino que la acidez se debe exclusivamente a la captación de grupos OH^- del agua:



Teniendo en cuenta esta lectura, la distribución de estos dos componentes (ácido bórico y tetrahidroxiborato) depende de la constante de disociación ácida K_a . Pese a que esta constante es igual a $5,8 \cdot 10^{-10}$ para una temperatura de $25^\circ C$, su valor tiene dependencia con la temperatura y la salinidad. Como se puede ver en la Tabla 8, cuando aumenta la temperatura, aumenta K_a y la solubilidad.

Tabla 8: Efecto de la temperatura sobre la solubilidad en agua y la primera constante de disociación K_a del ácido bórico a presión atmosférica.

(Kochkodan, Bin Darwish, & Hilal, 2015)

Temperatura ($^\circ C$)	Solubilidad en agua (% peso)	$K_a (\cdot 10^{10})$
15	4,17	4,72
20	4,65	5,62
25	5,44	5,79
50	10,24	8,32

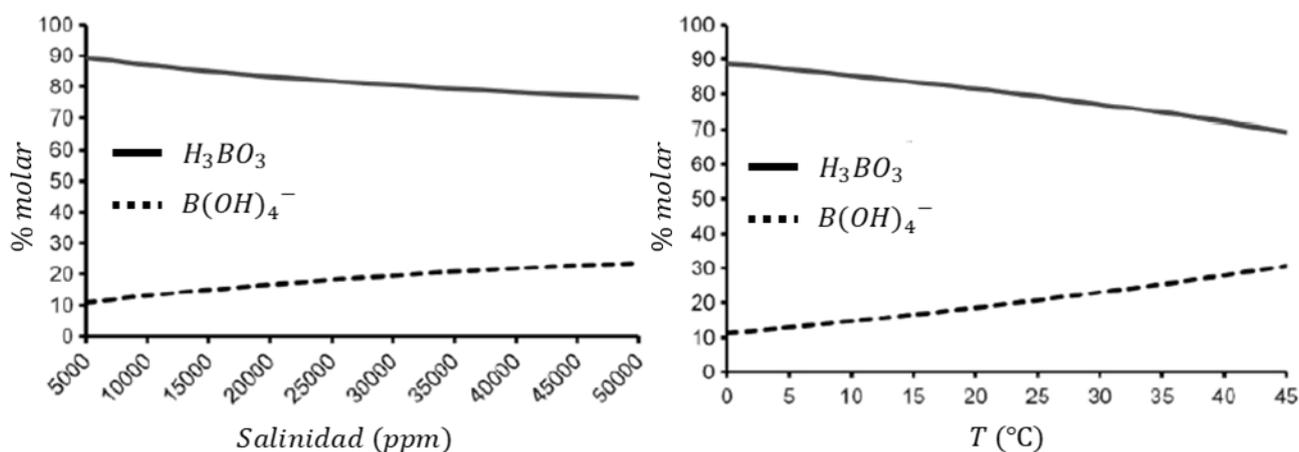


Figura 12: Distribución del ácido bórico y el ion tetrahidroxiborato en % molar con la salinidad y de la temperatura del agua. (Kochkodan, Bin Darwish, & Hilal, 2015)

Es por esta razón que, además de poder modificar el equilibrio de las reacciones al variar el pH , de la forma en que ya se ha indicado en la anterior interpretación teórica, también mediante la manipulación de la salinidad y la temperatura se puede conseguir variar la distribución de estas dos especies

químicas. En la Figura 12 se demuestra como la constante de disociación ácida depende de las dos variables descritas, así como también se describe la forma en la que cambia su valor en función de estas. Se observa que la fracción de iones borato del agua de mar aumenta con la salinidad y la temperatura.

Como se muestra en la Figura 13 para temperaturas de 10 y 35 °C, el anión borato monovalente $B(OH)_4^-$ predomina frente al ácido bórico no ionizado a un pH alto, mientras que el ácido bórico predomina a un pH bajo.

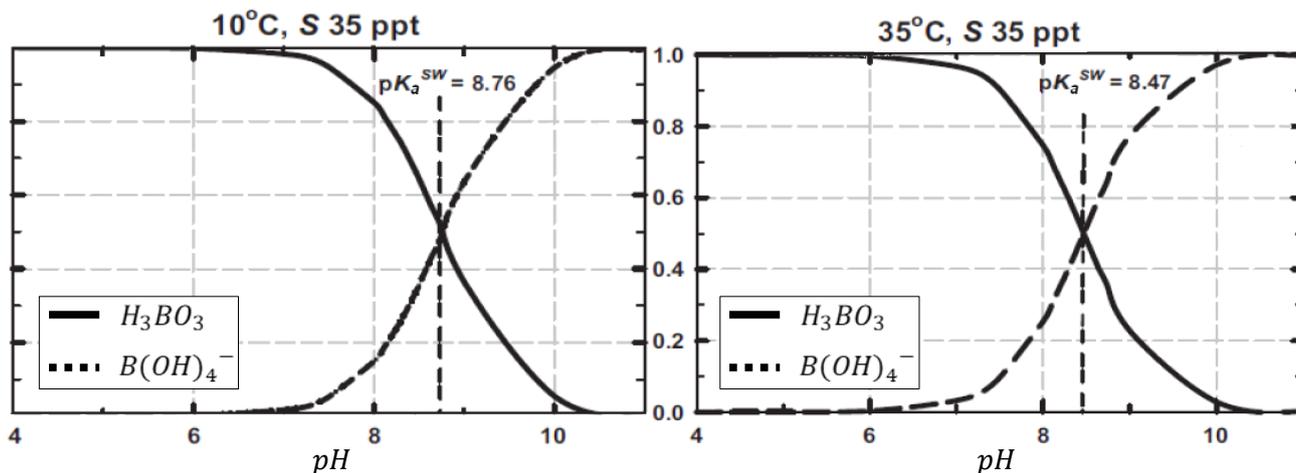
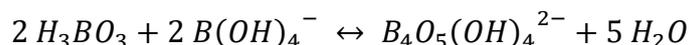
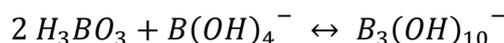


Figura 13: Fracción de ácido bórico y de ion tetrahidroxiborato en función del pH para un agua de mar con una salinidad del 35% y una temperatura de 10 y 35 °C respectivamente. (Kochkodan, Bin Darwish, & Hilal, 2015)

Dependiendo de la cantidad de boro en el agua se pueden encontrar unos compuestos u otros disueltos. A baja concentración ($< 0,02 \text{ mol/L}$), se presenta principalmente como las especies mononucleares H_3BO_3 y $B(OH)_4^-$ ya analizadas en la anterior página, mientras que en concentraciones más altas ($0,025 - 0,6 \text{ M}$) y con un aumento del pH de 6 a 10, tienden a formarse iones poliborato como $B_3O_3(OH)_4^-$, $B_4O_5(OH)_4^{2-}$ y $B_5O_6(OH)_4^-$. La formación de estos iones polinucleares se atribuye a la interacción del ácido bórico y los iones borato según las siguientes reacciones químicas:



En la Figura 14 se presenta la distribución de los iones borato polinucleares en función del pH para una concentración de $0,4 M$. Como se describe en la imagen, aumentar el pH suele dar lugar a iones de mayor nuclearidad, pero hasta cierto punto donde solo se forma $B(OH)_4^-$. La carga de los boratos puede llegar a aprovecharse para aumentar la eficacia de algunas técnicas de separación.

Cabe destacar que la formación de iones poliboratos con concentraciones de boro inferiores de $290 mg/L$ es nula.

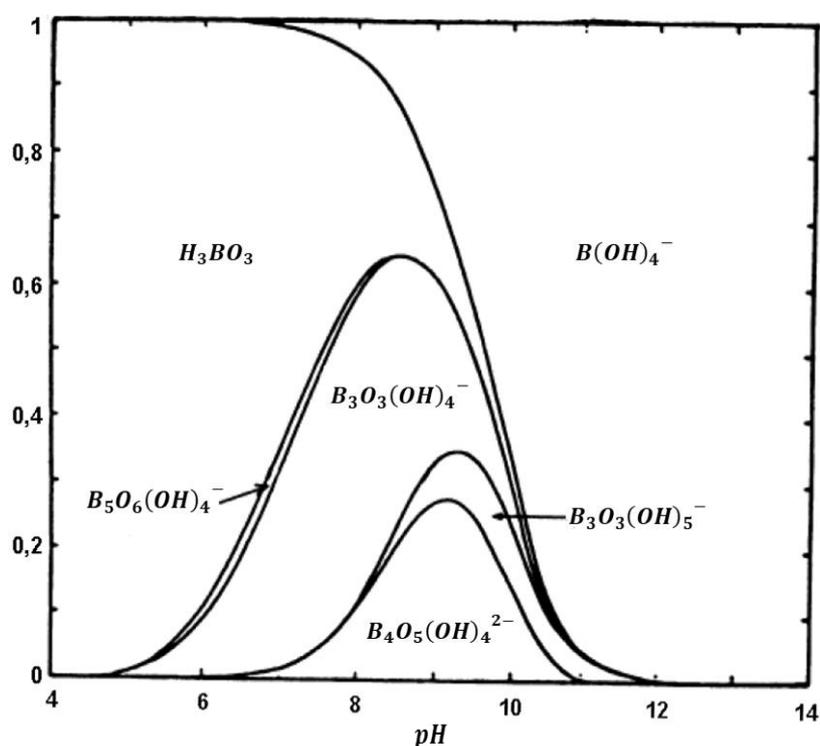


Figura 14: Fracción molar de las especies poliboradas en función del pH para una concentración de ácido bórico de $0,4 M$. (Kochkodan, Bin Darwish, & Hilal, 2015)

Otra posibilidad que cabe mencionar es la formación de complejos mediante ésteres con polioles. En medio acuoso, el ácido bórico y los iones borato reaccionan con alcoholes y compuestos que contienen múltiples hidroxilos (polioles) formando ésteres de boro. Véase la Figura 15 para identificar estos complejos.

El proceso de complejación implica la interacción del ácido bórico con el poliol o el ion borato con el poliol (Figura 16). En general, la estabilidad del complejo depende en gran medida del tipo de diol. Si la orientación de los grupos OH^- es favorable para la coordinación tetraédrica, es estable.

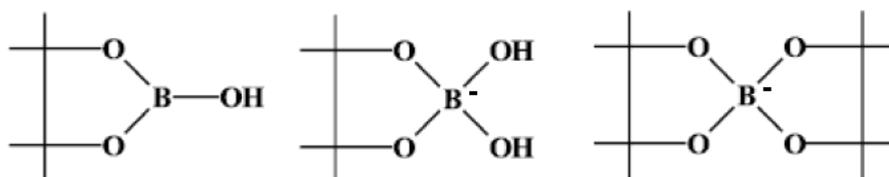
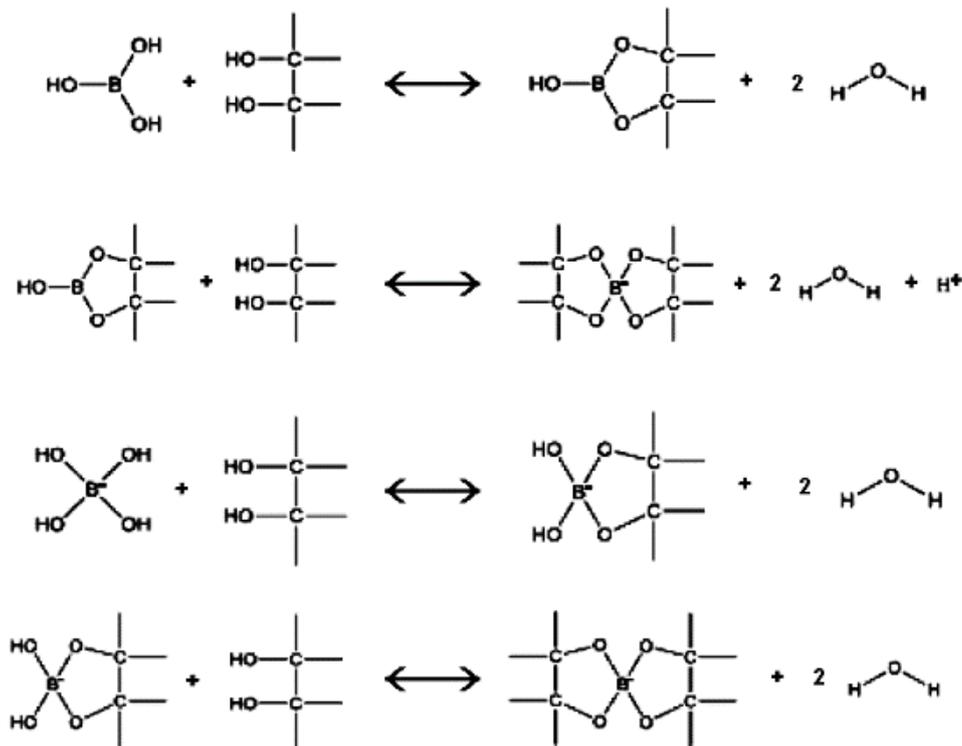


Figura 15: De izquierda a derecha, éster neutro de monoborato cis-diol, complejo de monoborato y complejo de bis(di-ol)borato.



(Kochkodan, Bin Darwish, & Hilal, 2015)

Figura 16: Reacciones generales de complejación del boro con polioles.
(Kochkodan, Bin Darwish, & Hilal, 2015)

A parte de la dinámica descrita en disolución acuosa, al calentar el ácido bórico por encima de los 170 °C, pierde una molécula de agua y se acaba convirtiendo en ácido metabórico (HBO_2) que, si se calienta de nuevo por encima de 300 °C se vuelve a deshidratar formando ácido pirobórico ($H_2B_4O_7$) o si, al contrario, se dan las condiciones y se mantiene a temperaturas altas ocurre la deshidratación total y se obtiene óxido bórico (B_2O_3).

5.4.3. Efectos en la salud

Aunque según los resultados de los ensayos de mutagenicidad el ácido bórico y el borax son reiteradamente inertes, en animales de laboratorio se ha observado que las exposiciones orales a corto y largo plazo afectan al aparato reproductor masculino, siendo este punto un objetivo constante de toxicidad. Se han observado lesiones testiculares en ratas, ratones y perros, y se ha demostrado experimentalmente la toxicidad para el desarrollo en ratas, ratones y conejos. En cuanto al consumo humano a largo plazo, parece afectar principalmente, de nuevo, al sistema reproductor masculino y aumentar el riesgo de cáncer.

El boro puede llegar a los seres humanos partir de la ingesta de alimentos y agua potable, pero también puede ser inhalado a través de las vías respiratorias o adsorbido si se establece contacto cutáneo. En general, la concentración máxima de boro permitida en el agua potable se suele determinar teniendo en cuenta una serie de factores que incluyen la salud humana y ecológica, las características sociales y naturales y el coste de las tecnologías de tratamiento del agua disponibles. Tanto en la legislación vigente, como en recomendaciones hechas por organizaciones tales como la Organización Mundial de la Salud existen límites establecidos para el boro. En la Tabla 9 se recogen algunos de estos límites.

Tabla 9: Concentración límite de boro en el agua según diferentes instituciones.

Agua	Territorio/Organización	Regulación	Límite (mg B/L)
Potable	Organización Mundial de la Salud	WHO (2009) Boron in drinking-water	2,4
	Unión Europea	Directiva 98/83/CE del 3 de noviembre de 1998 relativa a la calidad de las aguas destinadas al consumo humano	1
	España	Real Decreto 140/2003, de 7 de febrero, por el que se establecen los criterios sanitarios de la calidad del agua de consumo humano	1
Vertido	España	Ley 5/2002, de 3 de junio, sobre vertidos de aguas residuales industriales a los sistemas públicos de saneamiento	3
	España	Real Decreto 849/1986, de 11 de abril, por el que se aprueba el Reglamento del Dominio Público Hidráulico, que desarrolla los títulos preliminar I, IV, V, VI y VII de la Ley 29/1985, de 2 de agosto, de Aguas	2
Regadío	España	Real Decreto 1620/2007, de 7 de diciembre, por el que se establece el régimen jurídico de la reutilización de las aguas depuradas	0,5

A pesar de que durante muchos años el contenido en boro del agua potable no se consideró un posible impacto negativo en la salud humana, tras hallarse la aparición de efectos perjudiciales en varios estudios con animales, la OMS decidió en 1993 introducir por primera vez ciertas directrices provisionales para intentar reducir la concentración de boro en el agua potable. Basándose en el nivel en el que no se detectan efectos adversos en estos animales se estableció el límite en $0,3 \text{ mg/L}$, pero debido a la falta de tecnologías económicamente viables para la depuración del agua, este valor se incrementó a $0,5 \text{ mg/L}$ en 1998. Los extensos datos dietéticos de Reino Unido y de Estados Unidos mostraron que la ingesta de boro a través de los alimentos y del aire era menor a las suposiciones iniciales, por lo que se aumentó el límite de boro en el agua potable del 10% al 40%, sin acercarse al

límite diario de boro tolerable. Actualmente, el contenido límite en boro recomendado por la OMS en las directrices sobre la calidad del agua potable es de $2,4 \text{ mg/L}$ como bien se indica en la Tabla 9.

Dado que la influencia del boro en la salud humana no se ha dilucidado en profundidad, la mayoría de las directrices existentes son todavía valores provisionales que están sujetos a nuevos descubrimientos.

5.4.4. Tecnologías de eliminación del boro

El mecanismo más habitual de eliminación de boro de las aguas residuales es la ósmosis inversa, aunque también destacan otras opciones como el intercambio iónico y la electrodiálisis.

Otras operaciones minoritarias utilizadas para depurar los compuestos de boro del agua son la adsorción en sólidos inorgánicos para precipitar el boro como hidróxidos metálicos, la adición de Na(OH) o CaO para conseguir niveles de pH en los que el contaminante no sea soluble en agua o la prometadora, pero poco implementada, nanofiltración con membranas.

En este proyecto se apuesta por un método innovador de adsorción con carbón activo. La adsorción se desarrolla en profundidad más adelante en el punto 5.5. Adsorción. A continuación, se detallan los tratamientos más utilizados para extraer los compuestos de boro del agua:

5.4.4.1. Ósmosis inversa

Los procesos de ósmosis inversa emplean presiones de $0,3$ a $10,5 \text{ MPa}$ como fuerza impulsora para obligar a circular fluidos (principalmente agua) a través de membranas reteniendo simultáneamente las moléculas disueltas. Además de eliminar las bacterias y los virus, estas membranas se caracterizan por una retención de cloruro de sodio o sal común (NaCl) de más del 90% y de compuestos orgánicos neutros de más de 50 Da . El agua purificada producida se obtiene como permeado, mientras que el residuo concentrado se extrae como retentado.

En la aplicación como tratamiento de aguas residuales se han observado eliminaciones del 95% del carbón orgánico total, más del 90% de la DQO , más del 98% de los compuestos HAP y más del 99% de los pesticidas. Se han comprobado mayores retenciones con especies cargadas y disociadas que con las neutras y no disociadas.

Las membranas de ósmosis inversa están diseñadas para ofrecer una alta retención de sales, una alta permeabilidad, una robustez mecánica que permita soportar las condiciones de funcionamiento, una resistencia química suficiente para tolerar los fluidos de proceso, los limpiadores y los desinfectantes, un bajo ensuciamiento, una alta capacidad y un bajo coste. Las membranas predominantes son los polímeros celulósicos, los compuestos de película fina (TFC) formados por poliamidas aromáticas y la polieterurea reticulada. Las membranas de celulosa suelen tolerar un pH de 3 a 6 y de $0,3$ a

1 mg de cloro/L, mientras que las membranas de TFC suelen tolerar un pH de 3 a 11 y menos de 0,05 mg de cloro/L.

Los módulos de ósmosis inversa están disponibles en formato espiral, de fibra hueca, tubular y laminar. En la Figura 17 se pueden ver esquemas simples de cada uno de ellos y en la Tabla 10 se muestra una comparación de sus características principales.

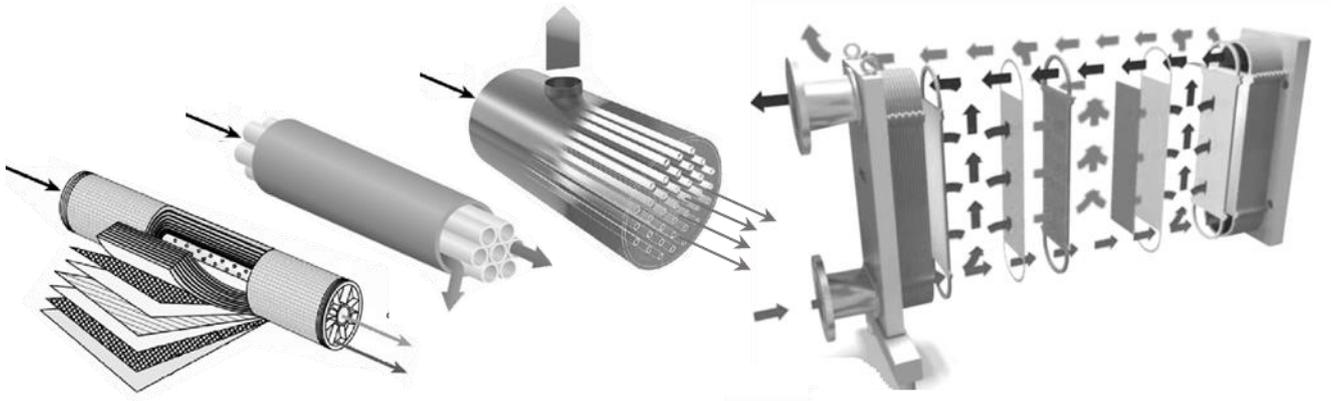


Figura 17: Módulos de ósmosis inversa en formato espiral, de fibra hueca, tubular y en lámina (de izquierda a derecha).

Tabla 10: Comparación de características entre los diferentes tipos de módulos de ósmosis inversa. (Don W. Green, Robert H. Perry, 2007)

Formato	Espiral	Fibra hueca	Tubular	Laminar
Densidad de empaquetamiento de membranas (m^2/m^3)	800	6000	70	500
Flujo de alimentación ($m^3/m^2 \cdot s$)	0,3 – 0,5	0,005	1 – 5	0,3 – 0,5
ΔP en el alimento (psi)	40 – 90	1,5 – 4,5	30 – 45	45 – 90
Probabilidad de taponamiento	Alta	Alta	Pequeña	Moderada
Facilidad de limpieza	Buena	Poca	Excelente	Buena
Coste relativo	Bajo	Bajo	Alto	Alto
Membranas disponibles	Celulósicas y TFC	Celulósicas y TFC	Solo celulósicas	Celulósicas y TFC

Los módulos en espiral son los más utilizados porque son robustos, más compactos, bastante económicos, fáciles de usar, menos propensos a deteriorarse y fáciles de limpiar. Un módulo en espiral estándar tiene un diámetro de 20 cm, una longitud de 1 m y una superficie total de unos 30 m².

En la Figura 18 se pueden observar las configuraciones simples habituales de los sistemas de ósmosis inversa con el objetivo de recuperar el producto permeado.

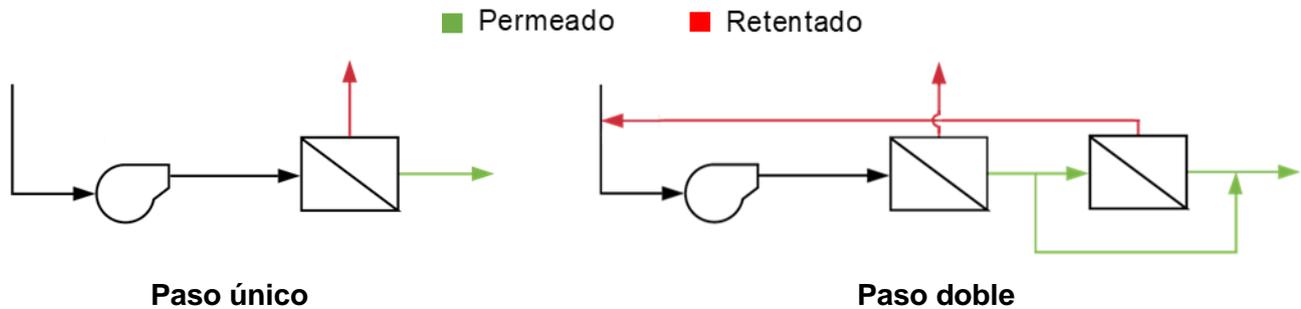


Figura 18: Diagrama de las configuraciones de ósmosis inversa de paso único y paso doble.

En la configuración de paso único, como su nombre indica, la alimentación pasa una única vez a través de una membrana, mientras que para la operación de doble paso se utiliza el permeado del primer módulo para alimentar al segundo módulo con la posibilidad de mezclar el primer permeado con el segundo para generar un producto aceptable y reducir el coste energético. La configuración de paso doble se recomienda para la desalación de aguas con más de 38000 mg/L y puede ser necesaria para impurezas en alta concentración y difíciles de eliminar, para productos de alta pureza y para módulos de baja retención.

Cuando se utilizan membranas en formato espiral, se suelen empaquetar normalmente en carcasas cilíndricas que contienen de 5 a 7 módulos y funcionan con una configuración de “retentados escalonados” en la que el retentado del primer módulo alimenta al segundo (véase la Figura 19). Esta configuración se utiliza con el objetivo de aumentar el índice de conversión, en el caso de una única etapa de carcasa se consigue escalar desde el 25 al

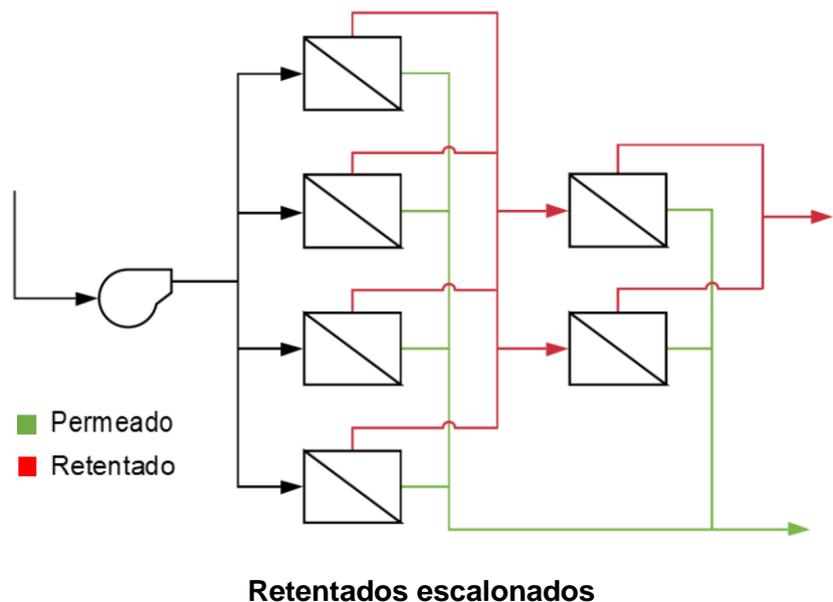


Figura 19: Configuración de “retentados escalonados” habitual en procesos de ósmosis inversa con membranas en espiral.

50%, en dos etapas del 50 al 75% y para tres del 75 al 90%. Debido a que el flujo se reduce después de pasar por la primera etapa por la relación de conversión, el sistema requiere que la segunda etapa tenga menor cantidad de membrana creando una configuración de "Árbol de Navidad". En este sistema puede ser necesario el bombeo entre etapas para conseguir mantener las presiones y los flujos deseados. Hay que mencionar que es indispensable incorporar antes del proceso de ósmosis inversa un pretratamiento que elimine ciertos compuestos que puedan obstruir los canales de alimentación, prevenga las incrustaciones minerales, así como el ensuciamiento por películas orgánicas y extraiga los oxidantes que pueden degradar las membranas. También es vital realizar limpiezas periódicas a las membranas para prolongar su vida útil y mantener su buen funcionamiento. Un tren de pretratamiento representativo se puede observar en la Figura 20.

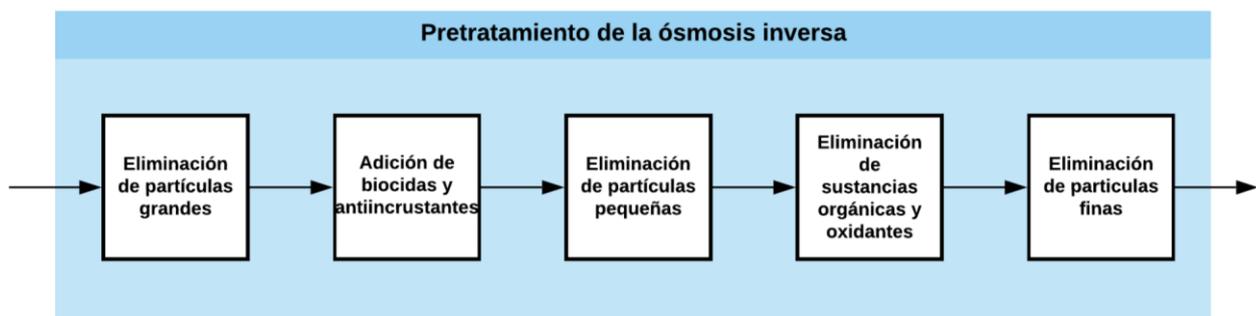


Figura 20: Esquema del pretratamiento habitual de una ósmosis inversa

Aunque cabe reconocer que existe la opción de incorporar recuperadores de energía que aprovechen la alta presión del retentado para rentabilizar la depuración mediante diversos mecanismos como las ruedas Pelton, las bombas de marcha atrás, los turbocompresores hidráulicos o los intercambiadores de presión, los requisitos energéticos para bombear a tan alta presión representan el mayor coste de explotación con diferencia. Entre el resto de los costes de explotación se encuentran el pretratamiento, el mantenimiento, la reposición de membranas y la limpieza. Las tecnologías de recuperación de energía son muy útiles para la desalación a alta presión, pero en la mayoría de los casos con menor salinidad la inversión no merece la pena.

La ósmosis inversa se utiliza principalmente en tareas de purificación de agua como la desalación del agua de mar (con concentraciones de sal de 35000 a 50000 mg/L y presiones de trabajo de 5,6 a 10,5 MPa) y tratamientos a aguas salobres a alta presión (concentraciones de sal de 5000 a 10000 mg/L con presiones de 1,4 a 4,2 MPa) y a baja presión (con concentraciones de sal próximas a 500 mg/L y presiones de 0,3 a 1,4 MPa). El agua permeada es de alta pureza y muy útil para calderas, laboratorios, dispositivos médicos (como los de diálisis renal), fabricación microelectrónica o elaboración de fármacos. En otras ocasiones el objetivo es recuperar ciertos compuestos como metales, anticongelantes, pintura, tintes o aceites de los retentados en lugar de depurar el agua. Este es el caso de la deshidratación de los zumos de frutas, la desalcoholización del vino y la cerveza o la recuperación de fármacos como la penicilina.

Aunque la ósmosis inversa no suele destinarse a la eliminación del boro en particular, sino a la depuración integral del agua, de manera directa o indirecta es la tecnología más utilizada para depurar el boro en el agua. Es importante señalar algunos de los requisitos para optimizar el proceso y conseguir una mayor retención de boro como, por ejemplo, la relevancia de elegir una membrana con una química adecuada, trabajar con pH y temperatura lo más alta posible para aumentar el valor de pK_a y desplazar la distribución del boro en el agua a iones borato para conseguir tener más compuestos de boro cargados y, por último, elevar la presión del proceso todo lo posible para conseguir mayores retenciones de boro (a costa de aumentar el consumo eléctrico). El mayor inconveniente de esta tecnología para la depuración de boro es el alto consumo energético derivado de las altas presiones empleadas, pudiendo llegar hasta los 40 *bar* o superiores, y el coste de las instalaciones capaces de trabajar en estas condiciones.

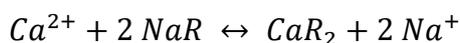
5.4.4.2. Intercambio iónico

Después de la ósmosis inversa esta es la tecnología más utilizada para eliminar el boro del agua.

En el intercambio iónico los iones de carga positiva y/o negativa de un fluido sustituyen a otras especies de la misma carga presentes inicialmente en un sólido que incorpora el fluido a depurar en su seno. Este sólido suele tratarse de un polímero, ya sea un gel o un sólido poroso, con grupos funcionales superficiales de carga opuesta.

A pesar de que las zeolitas fueron las primeras en utilizarse, la mayoría de los intercambiadores de iones que se utilizan a gran escala se basan en resinas sintéticas, ya sean presintetizadas y después cargadas como el poliestireno, o formadas a partir de monómeros activos (ácidos olefínicos, aminas o fenoles). Las resinas de intercambio catiónico generalmente contienen grupos de ácido sulfónico unidos o, más minoritariamente, grupos carboxílicos, fosfóricos, fosfínicos u otros, mientras que, las resinas aniónicas suelen incluir grupos de amonio cuaternario (bases fuertes) u otros grupos aminos (bases débiles). En la actualidad todavía se utilizan las zeolitas tanto naturales como sintéticas.

El intercambio de iones puede considerarse como una reacción reversible en la que intervienen cantidades químicamente equivalentes. Un ejemplo común de intercambio de cationes es la conocida reacción de ablandamiento del agua descrita a continuación, donde R representa un sitio aniónico univalente estacionario en la red polielectrolítica de la fase sólida de intercambio:



Esta reversibilidad permite la reutilización de los sólidos de intercambio iónico mediante una etapa de regeneración.

Cabe señalar que no se trata de una operación especialmente selectiva, puesto que difícilmente se puede conseguir la unión preferente de ciertos iones o clases de iones, ya que esto depende de muchos factores como del tamaño de los iones, la carga, o la estructura química.

En el uso específico de esta operación para la eliminación del boro, se emplean columnas rellenas de resinas de intercambio iónico con regeneración automatizada. Mediante la circulación del agua residual a través de estas columnas en ciclos sucesivos compuestos por una etapa de tratamiento y una etapa de regeneración de las resinas se consigue llegar a rendimientos de hasta más del 94%. Aun así, cabe destacar que los sólidos en suspensión del agua residual deben ser previamente eliminados, el coste de las resinas y del proceso es alto, las medidas de seguridad deben ser impecables debido al uso de ácidos y bases fuertes en la regeneración y, además, se trata de una operación lenta a causa de la cantidad de etapas involucradas

5.4.4.3. Electrodiálisis

Se trata de un proceso para eliminar iones de una disolución acuosa mediante el uso de membranas de intercambio iónico y la implementación de un campo eléctrico. La mecánica de esta operación consiste en la aplicación de una tensión eléctrica entre dos electrodos extremos generando en el agua un campo eléctrico suficientemente intenso como para conseguir desplazar los iones de la fase acuosa a la membrana de intercambio iónico.

Puesto que la intensidad del campo eléctrico es la fuerza impulsora de esta operación, al aumentar el voltaje y por tanto la intensidad de la corriente se consigue incrementar la cantidad de iones separados. Sin embargo, existe una intensidad límite a partir de la que en lugar de transferir iones se produce la disociación del agua. Esta y otras limitaciones, además del alto consumo energético, reducen la competitividad de la electrodiálisis dejando su uso reducido a los casos de concentraciones iónicas muy bajas.

En el caso de la depuración de boro se debe tener en cuenta la eliminación previa de los iones con mayor movilidad que los iones borato como por ejemplo los cloruros (Cl^-) y los sulfatos (SO_4^{2-}), por ello en los estudios se recomienda, una primera etapa de circulación con *pH* ácido en la que se eliminan estos iones de alta movilidad y una segunda etapa de circulación con *pH* básico para eliminar los compuestos de boro en forma de boratos.

5.5. Adsorción

La adsorción es el fenómeno superficial mediante el que se produce la adhesión y retención de las moléculas transportadas por un fluido gaseoso o líquido en la superficie de un sólido en contacto con

dicho fluido. Se trata de un proceso dinámico en el que la permanencia de las moléculas adsorbidas (adsorbato), puede verse comprometida y darse el fenómeno contrario a la adsorción, la desorción.

Cada uno de los golpes que ocurren entre las moléculas que arrastra un fluido y las moléculas superficiales de un sólido implican una probabilidad de adsorción o, por el contrario, de rebote. En la Figura 21 se puede observar un esquema aproximado del fenómeno.

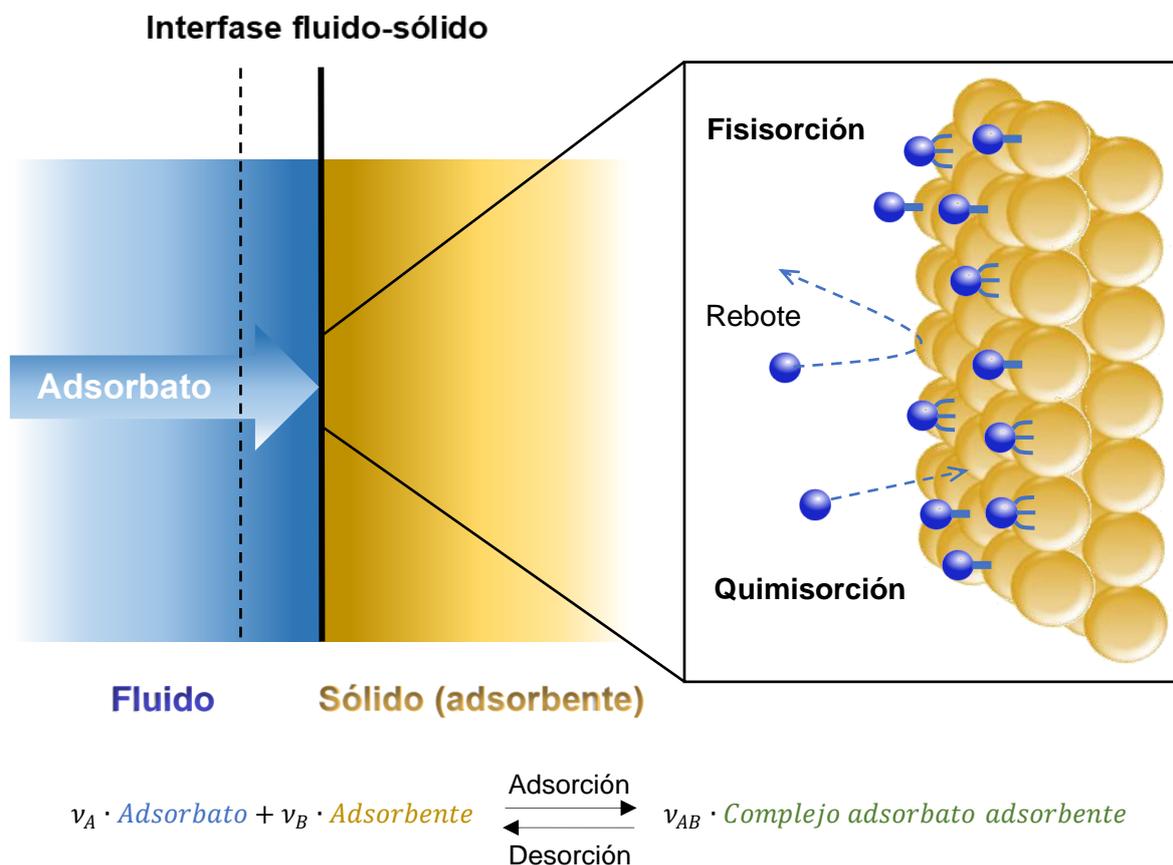


Figura 21: Representación aproximación del fenómeno de adsorción.

Ya que las superficies de los sólidos no son perfectas, es decir, presentan ciertos defectos como esquinas, escalones, vacantes, cavidades u otros, a la hora de seleccionar adsorbentes, se eligen sólidos porosos con la mayor cantidad de defectos superficiales posibles, de forma que exista una alta superficie específica y haya mas posiciones potenciales de adsorción. Los adsorbentes más utilizados son el carbón activo, el gel de sílice, la alúmina activada, las zeolitas, los tamices moleculares y los polimeros o resinas sintéticas.

La adsorción es el fundamento de muchas operaciones de separación de componentes de un medio líquido o gaseoso. Aunque el fenómeno de adsorción se puede dar tanto entre fases líquidas y sólidas, como entre fases gaseosas y sólidas, este estudio se centrará especialmnte en el primero de los dos casos descritos por razones obvias. Al igual ocurre con las diferentes familias de adsorbentes, el estudio está centrado en el carbón activo a pesar de la existencia de otros tipos.

5.5.1. Historia

Aunque desconocían gran parte del fundamento teórico del fenómeno, los antiguos egipcios, griegos y romanos ya se aprovechaban de las propiedades de adsorción de algunos materiales como la arcilla, la arena o el carbón vegetal para desalar el agua, clarificarla de grasas y aceites o tratar algunas enfermedades.

La acción adsorptiva de grandes volúmenes de gas por parte de ciertas formas del carbón vegetal se conoce desde hace milenios, pero los primeros estudios cuantitativos datan en 1733 por parte del científico Scheele.

Durante el siglo XIX científicos como Leslie, Saussure, Pouillet y Favre detectaron el carácter exotérmico de la adsorción. En 1881 Chappuis y Kayser fueron un paso más allá e intentaron relacionar la cantidad de gas adsorbida con la presión, asentando así el término de isoterma de adsorción. Van Bemmelen registró las primeras isotermas de adsorción el mismo año y durante los 20 siguientes se determinaron varias isotermas más para interacciones líquido-sólido.

A principios del siglo XX, en 1907, se realizaron diversas investigaciones cuantitativas sobre la adsorción de gases. Los avances más importantes en la interpretación teórica fueron realizados por Zsigmondy, Polanyi y Langmuir y sus ideas sentaron las bases de gran parte de las investigaciones realizadas en este siglo.

El científico americano Langmuir investigó el fenómeno a fondo. Tras numerosas investigaciones, descubrió que se trataba de un fenómeno superficial y desarrolló una de las ecuaciones más conocidas que describen el proceso de adsorción. Esta investigación entre otros logros en el campo de la química superficial fueron la razón de su Premio Nobel en Química en 1932.

Con la base de la investigación de Langmuir se presentó la teoría Brunauer-Emmett-Teller (BET) en 1938. En esta teoría se relaciona la finalización de una monocapa superficial con el comienzo de la sección casi o totalmente horizontal de las isotermas de adsorción (designado como Punto B), permitiendo cuantificar el área superficial de un material a partir de los datos de cantidad adsorbida. Aunque actualmente se apela a que se trata de un modelo excesivamente simple de adsorción multicapa y la fiabilidad es cuestionable a menos que se cumplan ciertas condiciones, durante más de 50 años atrajo una enorme atención y todavía a día de hoy es usado en ciertas aplicaciones.

En la década de 1930 se tomó cada vez más conciencia de que se podía distinguir entre la adsorción física caracterizada por interacciones de Van Der Waals y la adsorción química caracterizada por enlaces químicos.

En 1960 Dubinin y sus compañeros de trabajo en Moscú presentaron pruebas adicionales para demostrar que el mecanismo de fisiorción en poros muy estrechos no es el mismo que el que ocurre en superficie abierta o para poros más amplios. Se argumentó que los microporos se llenan a baja

presión relativa por un proceso de llenado de volumen y, estudiando una amplia gama de carbones activos, se identificaron tres grupos de poros de diferente anchura: microporos, poros transicionales (ahora llamados mesoporos) y macroporos.

Kiselev llevó a cabo una investigación clasificatoria de diversos adsorbentes y pudo demostrar que la adsorción de moléculas polares en superficies polares o iónicas ocurrían debido a ciertas interacciones específicas.

En los últimos años se han investigado los mecanismos de adsorción de sistemas concretos y se han desarrollado muchos nuevos adsorbentes como tamices moleculares de carbono, nuevas zeolitas, arcillas en pílora y sólidos mesoporosos. Además, ahora se pueden emplear varias técnicas espectroscópicas, microscópicas y de dispersión para estudiar el estado del adsorbente y su microestructura. Se han hecho grandes avances en la medición experimental de isothermas y calores de adsorción y en la simulación por computadora de la fisisorción.

Por otro lado, se ha hecho evidente que la interpretación de los datos de adsorción entre fases líquidas y sólidas es a menudo complicada y, aunque muchas isothermas tienen una forma similar a la isoterma clásica de Langmuir, rara vez se ajustan a la ecuación del modelo. Es indudable que hay que tener en cuenta la competencia entre soluto y disolvente, la disolución del soluto y, en muchos casos, la falta de equilibrio termodinámico.

Actualmente, la adsorción es especialmente utilizada en el sector de la potabilización y la depuración de agua, en los procesos de decoloración del sector alimentario y en el control de emisiones gaseosas de sustancias fétidas orgánicas. También se le da uso en procesos como la catalización de reacciones, la extracción de la humedad del aire, la obtención de nitrógeno, la cromatografía por adsorción, la recuperación de disolventes o la eliminación de fenoles y pesticidas.

En algunos casos, incluso le hace competencia a los métodos más asentados de destilación y absorción, este es el caso en la separación de n-parafinas de naftas, keroseno y gasóil, o en la separación de mezclas de ciertos compuestos como el p-xileno y el p-cresol de sus respectivos isómeros.

5.5.2. Dinámica

El proceso de adsorción de una molécula se puede describir en cuatro pasos elementales, aunque en el análisis cinético se suele obviar alguno debido a la alta velocidad en que ocurre:

1) Transporte del soluto desde el seno de la fase fluida hasta la película líquida que envuelve la superficie exterior del sólido adsorbente.

Este transporte se caracteriza mediante un coeficiente individual de transferencia de materia k_L , que es función de las variables del sistema, la especie transportada y la especie transportadora.

2) Transferencia del soluto a través de la película líquida que rodea el adsorbente hasta la superficie del adsorbente.

En gran parte de la bibliografía no se nombra esta etapa porque la resistencia que opone la película de líquido es ínfima y no es digna de estudio.

3) Transporte del soluto mediante difusión interna a través de la porosidad del elemento adsorbente hasta los centros activos de adsorción.

De todas las etapas, esta suele ser la más lenta y la que limita la velocidad del proceso global. También es la más problemática en su modelización puesto que compiten simultáneamente varios mecanismos de transporte (difusión libre, difusión Knudsen y migración superficial). Normalmente, esta tercera etapa se caracteriza mediante un coeficiente de difusión interna efectivo (D_e) que engloba las aportaciones de todos los transportes moleculares que se dan.

Algunos de los factores decisivos en esta etapa son el tamaño de poro, la superficie específica u otras características del sólido. A continuación, se explican varias variables de vital importancia para esta translación de las moléculas a adsorber por el interior del sólido adsorbente y se realizan algunas observaciones para poner en contexto la diversidad de los elementos adsorbentes:

La superficie específica (a) de un material se define como la superficie estructural total en relación con la cantidad de materia contenida en dicho material, es decir, la suma de la superficie generada por los poros del material y la superficie externa por unidad de masa:

$$a = \frac{\text{Área superficial total (m}^2\text{)}}{\text{Volumen o masa total de la muestra (m}^3\text{ o kg)}} = \frac{A_s}{m}$$

Por ejemplo, en el caso simple de un conjunto de partículas esféricas con densidad de partícula ρ y todas de diámetro D_p , la superficie específica se puede definir como:

$$a = \frac{6}{\rho \cdot D_p}$$

Aunque, ya que encontrar partículas perfectamente esféricas en la naturaleza es utópico, la esfericidad (Φ) es un factor útil para calcular diámetros equivalentes ($D_{p_{eq}} = \Phi \cdot D_p$). La esfericidad se puede obtener mediante la siguiente relación:

$$\Phi = \frac{\text{relación entre área y volumen de una esfera}}{\text{relación entre área y volumen de la partícula}} = \frac{\frac{6}{D_p}}{\frac{A_p}{V_p}}$$

Aun así, este ejemplo es demasiado simple puesto que no tienen en cuenta los posibles defectos superficiales que pueden darse en un sólido, así como las irregularidades estructurales que puedan generar oquedades como, por ejemplo, los canales porosos.

Según la IUPAC, la clasificación de los tamaños de poro se realiza en función de la distancia que separa dos de sus caras opuestas, es decir, su diámetro (d_p). Esta clasificación distingue:

- **Macroporos:** diámetros de poro superiores a 50 nm.
- **Mesoporos:** diámetros de poro en el rango 2 a 50 nm (poros de transición).
- **Microporos:** diámetros de poro inferiores a 2 nm.

Puesto que, obviamente, el diámetro de poro no tiene un significado preciso si no se conoce la geometría exacta de los poros (no tiene por qué ser circular), para representar el tamaño efectivo se suele tomar la longitud más pequeña entre pared y pared del poro. También cabe decir que en la naturaleza no todos los poros que forman la red de oquedades interna de un sólido tienen porque ser de igual tamaño, por lo que, se puede hablar de una distribución de tamaños de poro dentro de un mismo sólido.

La distribución de tamaños de poro de un adsorbente debe ser acorde con los requisitos del proceso de adsorción, es decir, aportar poros del gran tamaño para permitir la entrada masiva de los contaminantes al interior sin entorpecer o decelerar el proceso, pero tampoco deben ser poros demasiado grandes porque se perdería demasiada superficie específica útil. En conclusión, debe haber un compromiso entre poros grandes (macroporos) que sirvan de entrada y poros pequeños (microporos) para no comprometer la cantidad de centros activos de adsorción. Lo ideal, obviamente, sería el estrechamiento progresivo de los poros. Además, también es relevante la geometría de los poros (cilíndricos, tipo rendija, tipo embudo...) y el tipo. En la Figura 22 se puede observar una clasificación de tipos de poro según su recorrido dentro un grano genérico de adsorbente.

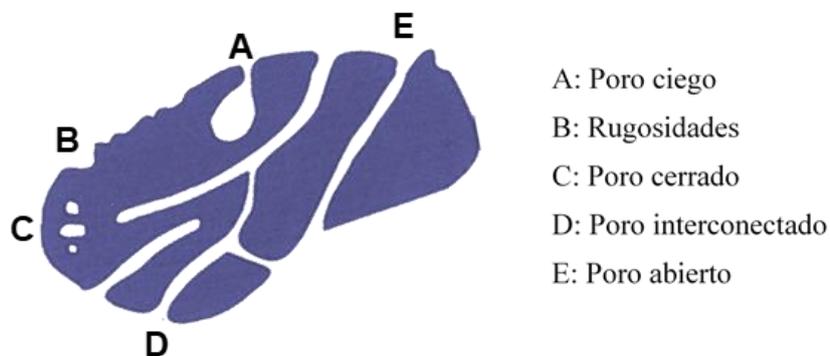


Figura 22: Representación de los diferentes tipos de poro de un sólido poroso (Clasificación de Rouquerol, 1990).

La caracterización de muchos materiales porosos se complica por la amplia distribución del tamaño, la forma y la complejidad de la red porosa. Para facilitar la aplicación de ciertos principios teóricos en muchos casos prácticos se suele suponer que la forma es cilíndrica.

4) Adhesión de las moléculas de adsorbato sobre los centros activos del adsorbente.

En esta última etapa es cuando ocurre la adsorción propiamente dicha. En función de la interacción adsorbato-adsorbente puede darse la adsorción por dos mecanismos diferentes:

- **Adsorción física o fisisorción:**

La unión del adsorbato y el adsorbente es mediante enlaces intermoleculares de naturaleza física que funcionan con fuerzas de Van Der Waals. A medida que las moléculas de soluto se acercan a la superficie sólida se establece un equilibrio entre las fuerzas intermoleculares de atracción y repulsión y, si otras moléculas ya estaban adsorbidas, también entran en juego las interacciones adsorbato-adsorbato.

Las fuerzas de atracción son débiles y, por esta razón, la fisisorción es un proceso fácilmente reversible. Además, no existe selectividad entre moléculas adsorbibles por lo que se pueden formar uniones con cualquier molécula diluida.

No se necesita aportar energía de activación alguna y el proceso es exotérmico, con una liberación de energía dentro del intervalo de -20 kJ/mol a -40 kJ/mol (suele ser del orden del calor latente de vaporización del adsorbato). El adsorbato mantiene su integridad como molécula porque la energía liberada es insuficiente para romper enlaces y transferir electrones, aunque su polaridad y geometría sí pueden distorsionarse.

La adsorción ocurre en multicapas, siendo la primera de las capas de interacción directa entre el adsorbente y el adsorbato y el resto de las capas de interacción adsorbato-adsorbato.

Se suele admitir que la velocidad de adsorción es instantánea ya que el enlace se realiza rápidamente.

- **Adsorción química o quimisorción:**

En este segundo tipo, la unión si se lleva a cabo mediante enlaces químicos covalentes tradicionales, siendo la interacción mucho más fuerte que en el caso de la fisisorción. El proceso puede tener carácter reversible o irreversible en función del tipo de reacción que sea, e incluso estar formado por dos etapas, una de irreversibilidad y otra de reversibilidad con equilibrio. Como se trata de una reacción química existe selectividad entre moléculas adsorbibles y adsorbente, lo que implica que no se adsorbe cualquier molécula, solo las que participan en la reacción.

Para que ocurra la adsorción se necesita llegar a cierta temperatura, por lo que existe una energía de activación mínima. Además, la adsorción puede ser exotérmica o endotérmica, aunque mayoritariamente son exotérmicas con entalpías de entre -10 kJ/mol y -500 kJ/mol . El adsorbato no mantiene su identidad ya que su estructura electrónica se modifica con la rotura y formación de enlaces al ocurrir la reacción.

En la adsorción química solo se crea una única capa alrededor de la superficie del adsorbente. Esto es debido a que el enlace químico solo se puede producir entre adsorbato y adsorbente y, una vez están todas las posiciones de la primera capa ocupadas, ya no queda más centros de adsorción disponibles. A pesar de que actúe en monocapas, sobre la primera capa quimisorbida pueden crearse múltiples capas de fisisorción.

En cuanto a la velocidad del proceso, dependiendo de las condiciones del sistema, puede ser rápida o lenta.

Desde el punto de vista de la operación básica de separación interesa una adsorción reversible frente a una irreversible, ya que la reversibilidad del proceso permite la regeneración del adsorbente. Aunque esto, obviamente, también depende de la aplicación que se desee dar a la adsorción.

En la Tabla 11 se puede ver un resumen de toda la información respecto a los dos tipos de adsorción descritos.

Tabla 11: Resumen de los tipos de adsorción.

	Fisisorción	Quimisorción
<i>Tipo de Interacción</i>	Fuerza intermolecular débil (Fuerzas de Van Der Waals)	Enlace químico fuerte
<i>Proceso</i>	Reversible	Depende de la reacción
<i>Selectividad</i>	No	Sí
<i>Energía de activación</i>	No	Sí
<i>Balance energético</i>	Exotérmica (valores bajos)	Normalmente exotérmica
<i>Integridad del adsorbato</i>	Si	No
<i>Capacidad</i>	Multicapa	Monocapa
<i>Cinética</i>	Instantánea	Depende de la reacción

En cuanto al fenómeno de desorción, si se produce, sigue la dinámica inversa descrita para la adsorción. La única característica destacable es la posible histéresis que ocurre en algunos sistemas. El fenómeno de histéresis surge normalmente en sistemas de interacción gas-sólido cuando la cantidad adsorbida no es igual en el equilibrio para el enfoque de la adsorción y el de la desorción a una determinada presión de equilibrio, es decir, el comportamiento de la isoterma de adsorción no coincide con el comportamiento de la isoterma de desorción.

Como se ha estado viendo a lo largo de este apartado, las operaciones de adsorción dependen de factores como:

- La cantidad de adsorbente (m_b) en el sistema, puesto que aporta la superficie y, en consecuencia, los centros de adsorción.
- La superficie específica del adsorbente (a) porque cuantifica el área superficial que hay disponibles por unidad de volumen o de masa.
- Parámetros relativos a las oquedades del adsorbente como la porosidad (ε), la tortuosidad (τ), la distribución de tamaño de poro, el diámetro de poro (d_p) y el tipo de poro porque tienen relación directa con la resistencia al transporte de materia y la superficie interna del sólido.

$$\tau = \frac{\text{Longitud de los canales porosos}}{\text{Longitud del lecho o grano}} = \frac{L_p}{L}$$

$$\varepsilon = \frac{\text{Volumen de vacío interno (m}^3\text{)}}{\text{Volumen total de partícula (m}^3\text{)}} = \left(1 - \frac{\rho_{apb}}{\rho_b}\right)$$

- El caudal (Q_v) en operaciones en continuo o el volumen (V) en operaciones en discontinuo para definir la cantidad de fluido que se aporta y también el flujo másico de las moléculas (\dot{m}_A) puesto que está relacionado con la energía cinética y la rapidez del fluido que las transporta.
- La cantidad de soluto en la fase fluida que se expresa como una concentración (c_{a_0}) en el caso de los líquidos y como una presión (p_{a_0}) en el caso de los gases.
- La temperatura del sistema (T) que, en fisisorción interesa baja para no provocar la desorción por exceso de movimiento y en quimisorción dependerá de la energía de activación y la naturaleza de la reacción. Termodinámicamente la máxima cantidad de adsorbato que es posible retener en el adsorbente aumenta al bajar la temperatura.
- La presión del sistema (P) para el caso de adsorción gas-sólido.

- Las afinidades, interacciones o fuerzas moleculares de los pares soluto-adsorbente, soluto-soluto, soluto-adsorbato, adsorbato-adsorbato y en el caso de que la adsorción sea con una fase líquida, soluto-disolvente y disolvente-adsorbente.
- Otras como la naturaleza del fluido, la solubilidad del soluto en el fluido, la estructura química del soluto, la competencia entre solutos adsorbibles, los grupos óxidos presentes en la superficie del adsorbente y, en caso de interacción con agua, también el pH .

Para estudiar el fenómeno de la forma más exhaustiva posible, se hace necesario investigar tanto las relaciones de equilibrio termodinámicas (expresadas mediante las isothermas de adsorción), como la cinética del proceso para conocer la velocidad en la que se alcanzan dichos equilibrios. Por esta razón, en los siguientes puntos se desarrollan en profundidad dichas temáticas.

5.5.3. Termodinámica y equilibrio

La termodinámica es la ciencia que se ocupa de explicar las causas de los cambios en el estado de un sistema en equilibrio, así como investigar y predecir cuál será el nuevo estado de equilibrio.

La adsorción es un proceso espontáneo ya que la entalpía libre de Gibbs disminuye en el sistema ($\Delta G_{Ads}^{\circ} < 0$). De la relación fundamental $\Delta G_{Ads}^{\circ} = \Delta H_{Ads}^{\circ} - T \cdot \Delta S_{Ads}^{\circ}$ se puede demostrar el carácter exotérmico del proceso, deduciendo lo siguiente:

$$0 > \Delta H_{Ads}^{\circ} - T \cdot \Delta S_{Ads}^{\circ}$$

$$\Delta H_{Ads}^{\circ} < T \cdot \Delta S_{Ads}^{\circ}$$

En la adsorción física la entropía disminuye debido a que mengua el número de grados de libertad, esto significa que ΔS_{Ads}° toma un valor negativo y, por lo tanto, ΔH_{Ads}° debe tener un valor todavía más negativo que ΔS_{Ads}° , es decir, para que el proceso sea espontáneo el proceso de fisisorción es exotérmico siempre, como ya se había indicado anteriormente.

Por otro lado, aunque normalmente la adsorción química es exotérmica, podría pasar que fuera endotérmica. En el caso exotérmico, el análisis es idéntico al hecho para la fisisorción. Para el caso endotérmico, la única posibilidad es que la entropía en lugar de disminuir, aumente. Esto puede ocurrir cuando el adsorbente permite la movilidad bidimensional completa del adsorbato sobre su superficie mediante migración superficial, aunque esta situación es extraña y se da en casos muy concretos.

Cuando en la adsorción se colocan las fases líquida o gaseosa (fluido) y sólida (adsorbente) en contacto, existe un desequilibrio desde el punto de vista de un determinado componente o, dicho de otra forma,

hay mayor cantidad de este componente en la fase fluida de la que hay adsorbida en las superficies del sólido. Esta situación crea un desequilibrio que se manifiesta mediante el tránsito de dicho componente a la fase sólida para su adsorción. El desequilibrio seguirá impulsando el proceso hasta que se llegue a un estado en el que las composiciones y las propiedades del sistema se mantienen constantes, este estado es el equilibrio.

El estudio de los estados de equilibrio es de gran importancia ya que se puede predecir cual es la cantidad máxima que se puede adsorber al sólido y, por tanto, eliminar del fluido. También se pueden buscar las condiciones más favorables para optimizar la máxima adsorción posible de un compuesto concreto.

La forma más habitual de representar el equilibrio de adsorción es mediante un gráfico llamado isoterma de adsorción. Estos gráficos representan la relación entre la cantidad máxima adsorbible ($q_{a_{eq}}$) a cierta temperatura y la cantidad de soluto en la fase fluida ($c_{a_{eq}}$) ($p_{a_{eq}}$ para gases):

$$q_{a_{eq}} = \frac{n_a \text{ o } m_a \text{ (moles o masa de adsorbato)}}{m_b \text{ (masa de adsorbente)}} = f(c_{a_{eq}})_T$$

En la Figura 23 se encuentra un ejemplo de isoterma de adsorción siendo el eje de abscisas la concentración del soluto en el equilibrio en la fase líquida (c_{eq}) (presión si es adsorción de gases (p_{eq})) y el eje de ordenadas la cantidad de adsorbato en el equilibrio por unidad de masa de adsorbente (q_{eq}).

La isoterma de adsorción se suele obtener de forma experimental porque es diferente para cada proceso de adsorción particular pues depende de diversos factores como la temperatura (T), la presión (P), la cantidad de adsorbente (m_b), su porosidad (ϵ) u otros. Se puede obtener de forma empírica repitiendo varias veces un experimento de adsorción con una cantidad de adsorbente variante en cada iteración, pero manteniendo una cierta temperatura de operación constante en todos los ensayos. Después de un tiempo suficientemente largo se alcanza el equilibrio y se puede medir la cantidad adsorbida, una vez obtenidos varios resultados, se pueden colocar como puntos en un gráfico. En los anexos (1. Adjuntos de los antecedentes) se puede ver un ejemplo de un ensayo de este tipo.

Una vez representados esos puntos, se realizan ajustes mediante los diferentes modelos de isoterma existentes para encontrar el mejor modelo y poder extrapolar la información experimental y determinar nuevos puntos sin necesidad de ir al laboratorio de nuevo. El estudio del tiempo necesario para alcanzar el equilibrio es competencia de la cinética química, la termodinámica solo considera los estados de equilibrio y no tiene en cuenta la velocidad del proceso. Es decir, la termodinámica considera tiempos de operación infinitos e ideales que habitualmente en el laboratorio se aproximan a periodos de tiempo de contacto muy largos para que se establezca la adsorción.

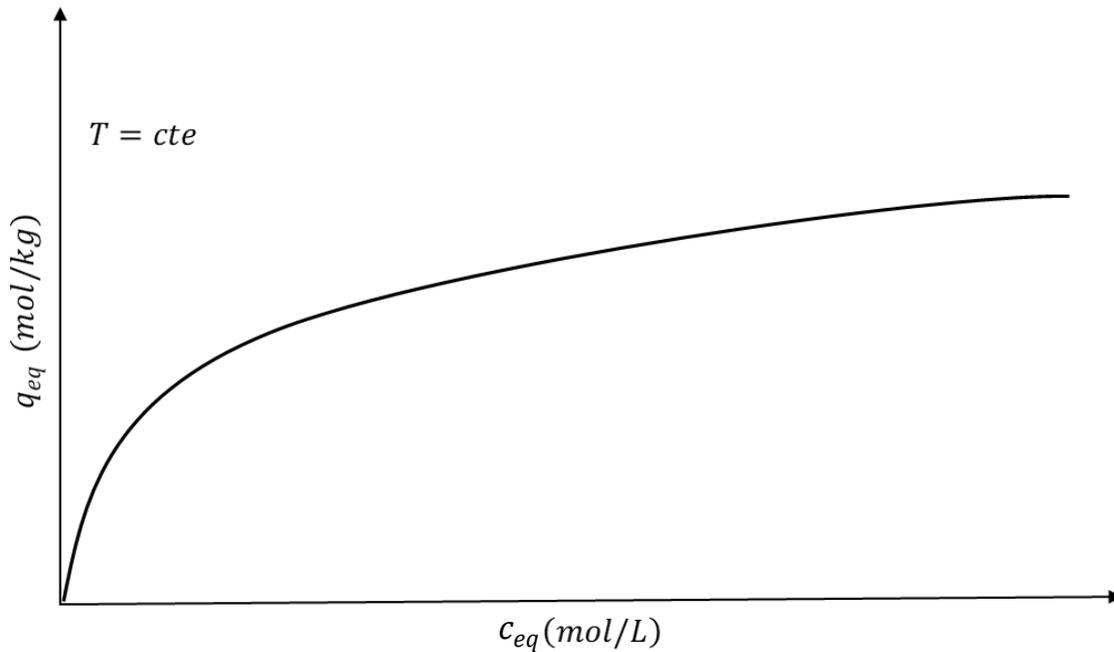


Figura 23: Ejemplo de isoterma de adsorción.

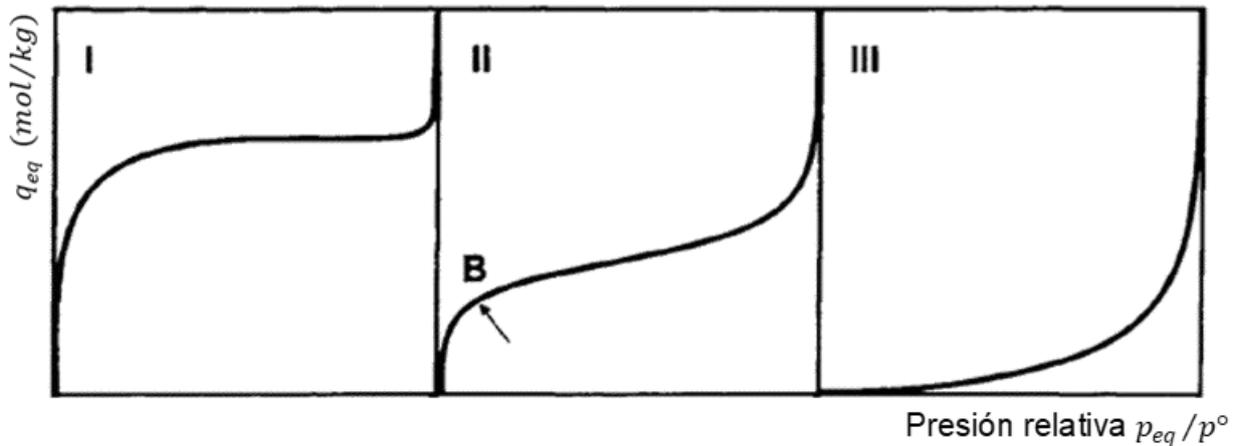
Existen muchas clasificaciones de las isotermas más comunes, aunque lo más común es dividir las en diferentes categorías en función del mecanismo de adsorción.

Fisorción de gases:

Aunque existe una gran variedad de formas, la mayoría de estas isotermas pueden agruparse en seis clases según la clasificación de la IUPAC. Los primeros 5 tipos, a menudo denominados como la clasificación Brunauer, fueron propuestos originalmente por S. Brunauer, L.S. Deming, W. S. Deming y E. Teller en 1940. En la Figura 24 se pueden ver los 6 tipos y una breve explicación de cada uno de ellos.

Quimisorción de gases:

La quimisorción de gases, ya que finaliza siempre al completar la monocapa, sigue la isoterma de Langmuir de forma bastante fiel, aunque el mecanismo de quimisorción no sea estrictamente el propuesto por Langmuir. En algunos sistemas y bajo ciertas condiciones, la lenta tasa de quimisorción dificulta la obtención de datos de equilibrio, pudiendo llegar a ser indetectable a baja temperatura o presión y sólo notable al modificar las condiciones experimentales.



Isoterma de Tipo I

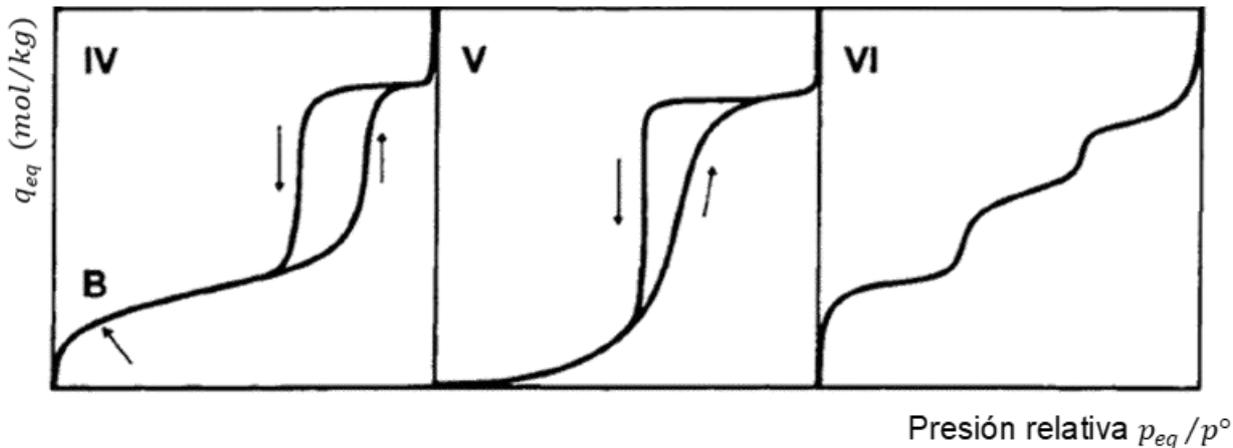
Cóncava respecto al eje de abscisas.
Alta adsorción a bajas presiones relativas. Alcanza una meseta (cantidad de adsorbato presenta valor límite cuando $p/p^0 \rightarrow 1$).
Implica un rango de tamaño de poro limitado y una superficie externa muy pequeña.

Isoterma de Tipo II

Cóncava, luego cuasilineal y, finalmente, convexa al eje de abscisas.
El punto B representa la finalización del llenado de la monocapa.
Se da con adsorbentes no porosos o macroporosos.

Isoterma de Tipo III

Convexa al eje de abscisas.
Es indicativa de interacciones débiles.
No es muy común.



Isoterma de Tipo IV

La región inicial es similar al tipo II. Tiende a estabilizarse a altas presiones relativas.
Presenta bucle de histéresis, debido al llenado y vaciado de los mesoporos mediante condensación capilar.
Es común, pero el bucle de histéresis varía entre sistemas.

Isoterma de Tipo V

Inicialmente convexa al eje de abscisas y se estabiliza a altas presiones relativas.
Indica interacciones débiles.
Presenta un bucle de histéresis debido al mecanismo de llenado y vaciado de los poros.
Es relativamente rara.

Isoterma de Tipo VI

También llamada isoterma escalonada.
Es relativamente rara y está asociada con la adsorción por capas en una superficie altamente uniforme.
La nitidez de los escalones depende del sistema y de la temperatura.

Figura 24: Tipos genéricos de isothermas de fisisorción de gases según la IUPAC. (Rouquerol, Rouquerol, & Sing, 1999)

Adsorción de solutos es un medio líquido:

En cuanto a la adsorción entre fases líquidas y sólidas, generalmente fisisorción, se ha de tener en cuenta que siempre implica una competencia entre el disolvente y los solutos. En 1960 se realizó una clasificación exhaustiva de tipos de isothermas de adsorción líquido-sólido (C. H. Giles, T. H. MacEwan, S. N. Nakhwa, & D. Smith, 1960), dicha clasificación realiza una división principal en 4 grupos primarios y una segunda división en subgrupos. Este sistema de clasificación destaca por su adaptabilidad y funciona especialmente bien a bajas concentraciones (mayoría de aplicaciones prácticas).

La división principal usa como criterio de clasificación la pendiente inicial de la isoterma, dividiendo las curvas en tipo S, L, C y H. Estos 4 tipos pueden observarse en la Figura 25.

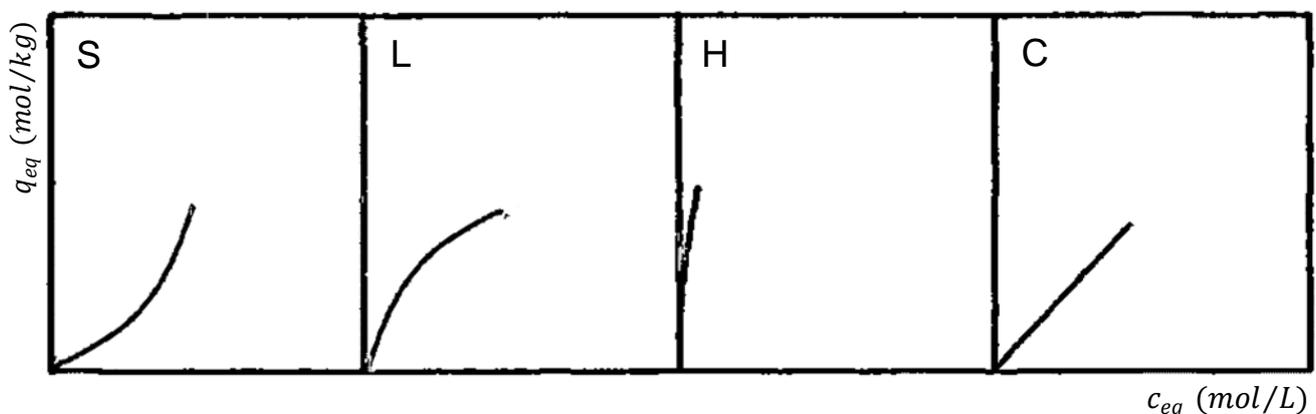


Figura 25: Clasificación primaria de isothermas de adsorción de solutos según Giles, Mac Ewan, Nakhua y Smith. (C. H. Giles, T. H. MacEwan, S. N. Nakhwa, & D. Smith, 1960)

La pendiente describe como varía la cantidad adsorbible máxima en función de la concentración en el equilibrio. Observando la dinámica que sigue la pendiente se pueden estudiar ciertas conductas en la adsorción. En el caso de la pendiente inicial se puede ver la afinidad del sistema cuando el soluto no está en alta concentración y, por tanto, la probabilidad de adsorción por encuentro fortuito es pequeña. En términos más simples, se puede ver si la adsorción se ve favorecida o perjudicada.

Normalmente, a medida que se adsorbe materia descende progresivamente la probabilidad de que una nueva molécula de soluto encuentre un lugar de adsorción debido a que el adsorbente se va saturando. Este mecanismo se aplica al grupo de curvas tipo L y a las etapas posteriores de los grupos S y H. Sin embargo, también puede ocurrir que cuanto mayor sea la cantidad adsorbida, mayor sea la probabilidad de adsorción. Esto implicaría una relación de atracción del soluto ya adsorbido y el soluto en el líquido, este fenómeno recibe el nombre de adsorción cooperativa y se aplica a la parte inicial del grupo de curvas tipo S y en las curvas tipo C.

A continuación, se describe en detalle cada tipo y las condiciones o sistemas en los que aparecen:

- Isotermas tipo S:

La curvatura convexa respecto al eje de abscisas implica que la adsorción es mayor a medida que aumenta la concentración. Suele aparecer cuando el soluto a adsorber cumple las siguientes 3 condiciones:

- Tiene una parte hidrofóbica bastante grande y la adsorción es más estable en lugares adyacentes a otras partículas ya adsorbidas (Observar la Figura 26, donde la posición *a* es más estable que la *b*)
- Tiene una atracción intermolecular adsorbato-soluto, lo que hace que se empaquete verticalmente en disposición regular en la capa adsorbida.
- Tiene competencia de adsorción con las demás moléculas del disolvente.

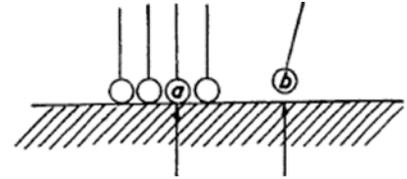


Figura 26: Adsorción adyacente.
(C. H. Giles, T. H. MacEwan, S. N. Nakhwa, & D. Smith, 1960)

- Isoterma tipo L (normales o de “Langmuir”):

Como tiene forma cóncava respecto al eje de abscisas, a medida que aumenta la cantidad de adsorbato, la capacidad de adsorción del sólido es menor. Es la más común de las cuatro. Los sistemas de adsorción de este tipo cumplen una de las siguientes condiciones:

- Las moléculas se adsorben planas a la superficie. Obsérvese la Figura 27.
- Las moléculas se adsorben perpendicularmente a la superficie, pero sufren poca competencia (se adsorbe mucha cantidad y enseguida llega a una meseta porque ya ha alcanzado el máximo). Esto puede ocurrir en:

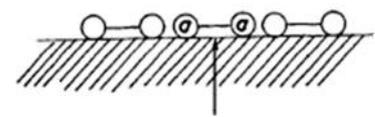


Figura 27: Adsorción plana.
(C. H. Giles, T. H. MacEwan, S. N. Nakhwa, & D. Smith, 1960)

- Sistemas con soluto y adsorbente altamente polar.
- Sistemas con solutos iónicos en disolución acuosa con una adsorción causada por atracción intermolecular muy fuerte entre iones.

- Isotermas tipo H (de alta afinidad):

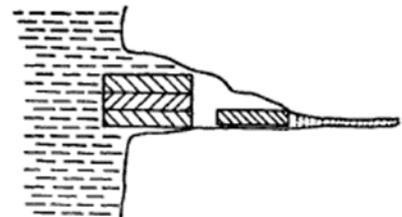
Se trata de un caso especial del tipo L en el que la parte inicial de la isoterma es vertical, lo que significa que el soluto tiene una afinidad tan alta que se adsorbe completamente.

Las especies adsorbidas suelen ser unidades grandes (micelas iónicas o moléculas poliméricas), pero a veces son iones aparentemente únicos que se intercambian con otros de afinidad mucho menor.

- Isotermas tipo C (de reparto constante):

Son lineales debido a que los solutos penetran en el sólido más fácilmente que el disolvente. Se caracterizan por el constante reparto del soluto entre disolvente y adsorbente hasta llegar al máximo. Las condiciones que favorecen este tipo de isoterma son:

- Un adsorbente poroso con moléculas flexibles y regiones de diferente grado de cristalinidad.
- Un soluto con mayor afinidad por el adsorbente de la que tiene el disolvente y con mayor penetración en las regiones cristalinas por su geometría molecular. Puede ser que, tal como se indica en la Figura 28, el soluto rompa los enlaces intermoleculares del adsorbente y entre en la estructura del adsorbente más fácilmente que el disolvente.
- La división de un soluto de solubilidad limitada entre dos disolventes inmiscibles que no penetran entre las moléculas del otro, pero el soluto penetra en ambos disolventes.



*Figura 28: Afinidad del soluto.
(C. H. Giles, T. H. MacEwan, S. N. Nakhwa, & D. Smith, 1960)*

Por otro lado, el criterio de clasificación para los subgrupos depende del comportamiento posterior al origen de la curva en el gráfico, incluyendo la aparición de mesetas, cambios de pendiente, escalones, máximos y otros fenómenos topológicos relacionados con la capacidad de adsorción del adsorbente cuando ya se encuentra relativamente lleno. A continuación, se relacionan algunos de estas topologías con las características de la adsorción:

- Mesetas o cambios de pendiente repentinos:

La mayoría de las isotermas suficientemente completas contienen una meseta o una zona de inflexión de cambio de pendiente, similar al punto B definido por Brunauer en sus isotermas de fisisorción de gases (véase el tipo II y IV en la Figura 24). Estos fenómenos representan la "saturación de primer grado", o sea, el llenado de todos los sitios disponibles en la superficie original de adsorbente y, por tanto, la construcción completa de una monocapa. La monocapa puede consistir en:

- Moléculas de disolvente y moléculas de solutos.
- Grupos aislados adsorbidos en los lugares más activos del adsorbente.
- Micelas iónicas, ya sean empaquetadas o separadas.

Las curvas que no contienen estas mesetas o puntos de inflexión suelen ser debido a la falta de datos experimentales en la parte lejana al origen de coordenadas.

- Longitud de las mesetas:

La extensión de la meseta describe la barrera energética que debe superar el soluto para ser adsorbido en nuevos lugares una vez completa la monocapa. Esta barrera se puede deber a que la afinidad soluto-disolvente sea más alta a la afinidad soluto-monocapa y es algo característico de la adsorción de moléculas cargadas ya que, una vez llena la monocapa, existe una repulsión fuerte al resto del soluto con la misma carga.

- Segundos aumentos de pendiente y nuevas mesetas:

Un segundo aumento de pendiente se atribuye al desarrollo de una nueva superficie en la que puede producirse la adsorción y una segunda meseta representa la saturación completa de esta nueva superficie. La obtención de una nueva superficie de adsorción puede ser debida a:

- a) Adsorción sobre la monocapa ya completada.
- b) Nuevo acceso a regiones cristalinas del adsorbente.
- c) Reorientación de las moléculas de adsorbato dejando al descubierto parte de la superficie original.

- Máximos.

La aparición de un máximo puede deberse al aumento de la atracción soluto-soluto y, por tanto, la disminución de la atracción soluto-adsorbente.

Aun con esta información, la adsorción depende de gran cantidad de factores y a veces un cambio pequeño en alguno de ellos puede provocar cambios en la dinámica del proceso y en consecuencia en la clase de isoterma.

Desde el punto de vista práctico se pueden considerar cuatro tipos idealizados de isotermas a las que la mayoría de los sistemas se ajustan bastante bien. Estos cuatro tipos se hayan representadas en la Figura 29. Las isotermas de equilibrio irreversible son aquellas en las que la capacidad de adsorción del sólido no varía con la concentración de la fase líquida, el equilibrio favorable implica que el adsorbente presenta grandes capacidades de adsorción para pequeñas concentraciones de soluto en la fase líquida, el equilibrio desfavorable se presenta en el caso contrario al favorable, es decir, cuando el adsorbente tiene pequeñas capacidades de adsorción para concentraciones bajas en la fase líquida y, por último, el equilibrio lineal es aquel en el que existe una relación lineal entre la capacidad de adsorción y la concentración en la fase líquida.

Con tal de poder modelizar los procesos de adsorción se desarrollaron diversos modelos matemáticos que intentan describir el comportamiento de la curva isoterma y predecirlo. Para poder asimilar un equilibrio de adsorción particular a uno de estos modelos matemáticos, primero es necesario comprobar experimentalmente la topología de la isoterma de adsorción que se deseé modelizar y, a continuación, comprobar si se ajusta al modelo seleccionado de forma aceptable. En función de la

validez del ajuste al modelo, la fiabilidad para predecir comportamientos futuros del sistema es mayor o menor.

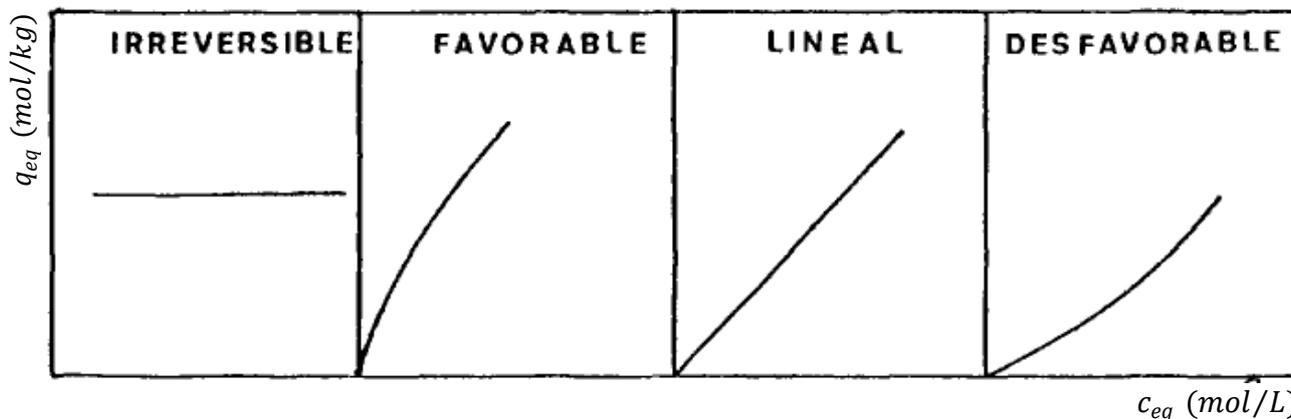


Figura 29: Clasificación práctica de isothermas de adsorción líquido-sólido. (C. H. Giles, T. H. MacEwan, S. N. Nakhwa, & D. Smith, 1960)

Para poder obtener la isoterma de forma experimental, como ya se ha mencionado anteriormente, es necesario conseguir parejas de datos de la concentración en el fluido (c_{eq} o p_{eq}) y la cantidad adsorbida en el adsorbente (q_{eq}) de cierto componente después de que haya pasado suficiente tiempo como para que el sistema se encuentre en equilibrio. Repitiendo esta misma técnica para concentraciones iniciales (c_0) distintas y variando la masa de adsorbente (m_b) para cada una de estas concentraciones se obtiene finalmente suficientes puntos como para poder representar la curva isoterma de adsorción del sistema.

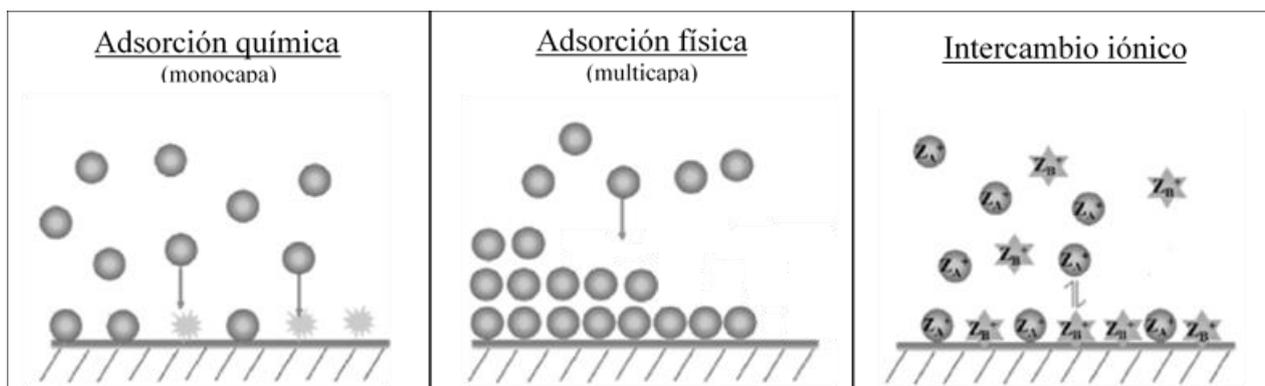


Figura 30 Representación de los diferentes mecanismos de adsorción.

Una vez obtenidos los datos experimentales, mediante regresiones se pueden ajustar estos datos a los modelos existentes para encontrar el más representativo. El ajuste a un modelo isotérmico de adsorción por parte de un sistema particular también puede dilucidar los mecanismos de adsorción que sigue, aportando información útil para el diseño de adsorbentes o sistemas de adsorción más efectivos en ese caso concreto. Los mecanismos de adsorción generales (Figura 30) son principalmente adsorción

química, adsorción física e intercambio iónico, aunque este último suele ser tratado como un caso aparte y por eso en la investigación presente no se va a desarrollar más allá de esta mención. Para más información sobre las diferencias entre la adsorción física y la adsorción química consultar la Tabla 11.

En lo referente a los modelos de isothermas, existen tanto modelos teóricos como empíricos. Debido a que estos últimos carecen de un soporte teórico sustancial, los mecanismos de adsorción no pueden ser esclarecidos a partir de un buen ajuste de las isothermas experimentales.

Mayoritariamente, debido a su simplicidad, se suele aplicar un método de regresión lineal para obtener los parámetros de los modelos. Sin embargo, la linealización de los modelos de adsorción puede cambiar las variables dependientes e independientes originales e introducir errores en la determinación de los parámetros. Por esta razón, para aumentar la exactitud en la determinación de los parámetros en algunos casos es más conveniente aplicar un método de regresión no lineal, aunque sea más complicado el cálculo.

También se ha de tener en cuenta que en algunos casos la estequiometría de la adsorción no es 1:1, o, dicho de otra forma, no en todos los sistemas un centro de adsorción del sólido adsorbe una única molécula de adsorbato, y viceversa. En la adsorción de algunos gases, por ejemplo, se produce una disociación del gas previa a la adsorción.

A continuación, en la Tabla 12, se presentan tres de los modelos más relevantes, aunque cabe destacar que existen multitud de ellos, con mayor complejidad y unos para condiciones más específicas que otros.

Tabla 12: Modelos comunes de isotermia de adsorción.
(Wang & Guo, 2020)

	Ecuación	Linealización	Observaciones
<p><i>Modelo lineal (ley de Henry)</i></p>	$q_e = K \cdot C_e$ <p>K: Constante de Henry (L/kg).</p>	<p>—</p>	<p>Se trata del modelo más simple. Describe la adsorción monocapa ideal a bajas concentraciones de adsorbato.</p> <p>La idealidad comporta suponer que la superficie del adsorbente es homogénea (distribución de espacios de adsorción homogénea, es decir, el proceso de adsorción se produce en sitios localizados definidos idénticos y equivalentes) y que cada molécula de adsorbato es independiente, es decir, no interactúa con el resto de las moléculas de adsorbato. Cada molécula posee energías de activación y entalpías de adsorción constantes. No existe difusión superficial.</p>
<p><i>Modelo de Langmuir</i></p>	$q_e = \frac{q_m \cdot K_L \cdot C_e}{1 + K_L \cdot C_e}$ <p>K_L: Constante de Langmuir (L/kg). q_m: Máxima capacidad de la monocapa (mol/kg).</p>	$\frac{C_e}{q_e} = \frac{C_e}{q_m} + \frac{1}{K_L \cdot q_m}$	<p>Comúnmente aplicado. Fue elaborado para representar la adsorción gas-sólido monocapa ideal no lineal.</p> <p>Supone que el adsorbente dispone de un número finito de centros de adsorción.</p> <p>La naturaleza de la adsorción se indica por el factor de separación R_L que puede ser lineal ($R_L=1$), irreversible ($R_L=0$), no favorable ($R_L > 1$) o favorable ($0 < R_L < 1$).</p> $R_L = \frac{1}{1 + K_L \cdot C_0}$ <p>La ecuación isotérmica de Langmuir puede ser modificada para la adsorción en fase acuosa de la siguiente manera:</p> $q_e = q_m \cdot \frac{R_L \cdot C_e}{1 + R_L \cdot C_e}$
<p><i>Modelo de BET (Brunauer, Emmet y Teller)</i></p>	<p>Para n_{BET} (número de capas) $\rightarrow \infty$:</p> $q_e = \frac{q_{mBET} \cdot K_{BET1} \cdot C_e}{(C_s - C_e) \cdot [1 + (C_{BET} - 1) \cdot \frac{C_e}{C_s}]}$ <p>K_{BET1} y K_{BET2}: Parámetros del equilibrio de adsorción en la primera y las siguientes capas (L/mg). C_{BET}: Constante de BET (—). q_{mBET}: Máxima capacidad de la monocapa (mg/g). C_s: Solubilidad del adsorbato (mg/L).</p>	$\frac{C_e}{q_e \cdot (C_s - C_e)} = \frac{1}{q_{mBET} \cdot C_{BET}} + \frac{(C_{BET} - 1) \cdot C_e}{q_{mBET} \cdot C_{BET} \cdot C_s}$	<p>Se propuso para representar la adsorción multicapa de gas. Asume adsorción homogénea multicapa, la energía de adsorción en cada capa es diferente.</p> <p>Es una ampliación del modelo de Langmuir. Tiene las mismas suposiciones y añade otras dos, considerar que la energía implicada en la adsorción de la primera capa es diferente respecto a la de las capas posteriores y que, con la concentración de saturación, el número de capas tiende a ser infinito.</p> <p>Existen diversas modificaciones, del modelo como, por ejemplo, la isotermia BDDT que contabiliza el número de capas adsorbidas, pero es complicado y apenas se utiliza, o la isotermia n-BET si el número de capas en la adsorción es limitado.</p>

5.5.4. Cinética

La cinética se ocupa de estudiar la velocidad a la que ocurren los procesos. En este caso, la velocidad efectiva de adsorción es función de las resistencias que se oponen al transporte de materia. Estas resistencias son función de parámetros tanto del adsorbente, como del adsorbato, como del fluido o medio en contacto con el sólido. Generalmente, se pueden dividir en:

- 1) El transporte de materia desde el seno de la fase fluida hasta la superficie exterior del sólido adsorbente.
- 2) La difusión de materia desde la superficie externa del adsorbente hasta los centros de adsorción.
 - a) Difusión a través de los poros del sólido adsorbente.
 - b) Difusión superficial.
- 3) Difusión superficial.

Así distribuidas, la primera corresponde al transporte intermolecular en el fluido y se produce en serie con la resistencia al transporte intramolecular correspondiente a la segunda (divisible en dos contribuciones, 2a y 2b). La importancia de cada una de ellas respecto a las demás depende de la naturaleza del sistema y las variables de operación. A continuación, se explican en profundidad:

1) **Transporte de materia desde el seno de la fase fluida hasta la superficie exterior del sólido adsorbente.**

Esta velocidad se modela mediante la segunda ley de Fick como el producto de un parámetro representativo de la resistencia opuesta y una fuerza impulsora lineal. El coeficiente individual de transferencia de materia (k_L) representa a la resistencia en sí y se suele obtener experimentalmente, mientras que la fuerza impulsora es la diferencia de concentraciones:

$$\dot{m}_A = k_L \cdot (c - c^i)$$

La transferencia de materia se realiza desde el fluido a la superficie del sólido ($c > c^i$).

Habitualmente, la resistencia opuesta a esta transferencia de materia es despreciada en el fenómeno global de adsorción. Esta simplificación ocurre porque en los diseños experimentales es muy sencilla de contrarrestar; en caso de utilizar adsorbente en polvo, con un mecanismo de agitación se consigue incrementar el contacto con el adsorbente y reducir en gran medida el transporte a través de la fase líquida, mientras que en el caso de utilizar adsorbente granulado, si la dispersión del adsorbente en el interior del depósito es abundante y el depósito está perfectamente relleno, el soluto tiene acceso casi instantáneo a la superficie externa del adsorbente.

2) La difusión a través de los poros del sólido adsorbente.

Esta difusión puede ser mediante difusión molecular (o de Maxwell) si los poros son grandes, o por difusión Knudsen en caso de microporos con un diámetro menor al recorrido libre promedio de las moléculas a adsorber (véase la Figura 31).



Figura 31: Representación de la difusión molecular y la difusión Knudsen respectivamente. (Bohórquez, 2018)

- En la difusión molecular el transporte se produce sin restricción por el ancho de poro, es decir, mediante las colisiones moleculares de la fase fluida dentro del poro.
- En cambio, la difusión Knudsen ocurre si la difusión está restringida por el ancho de poro y no permite a las moléculas finalizar su recorrido libre promedio por el choque con las paredes de los poros.

Ambos transportes tienen un gradiente de concentración decreciente y pueden ser descritos por la ley de difusión de Fick con el coeficiente de difusión adecuado.

A falta de datos experimentales, el coeficiente de difusividad molecular para una mezcla binaria de A (soluto) y B (disolvente) se obtiene a partir de la correlación de Wilke y Pin Chang (Wilke, C.R., Chang, P, 1955):

$$D_M = (7,4 \cdot 10^{-8}) \cdot \frac{(n \cdot M_b)^{1/3} \cdot T}{\mu \cdot v_a^{0,6}}$$

Donde:

n es un parámetro asociado al disolvente (para el agua es 2,6). v_a es el volumen molar de soluto (m^3/mol).

μ es la viscosidad (cp).

T es la temperatura (K).

Mientras que el coeficiente de difusividad Knudsen, se puede calcular a partir de la fórmula de la teoría cinética si no se dispone de datos experimentales:

$$D_K = \frac{1}{3} \cdot d_p \cdot u = \frac{1}{3} \cdot d_p \cdot \left(\frac{8 \cdot R \cdot T}{\pi \cdot M_a} \right)^{1/2}$$

Donde:

u es la velocidad intersticial (m/s).

T es la temperatura (K).

Los datos de la distribución de tamaño de poro del adsorbente y los tamaños moleculares de adsorbatos permiten determinar el modo de transporte difusivo predominante, pero cuando el promedio del recorrido libre del adsorbato y el radio de los poros son de una magnitud similar pueden producirse ambos mecanismos en un mismo medio poroso. En ese caso, el coeficiente de difusividad neta se calcula en proporción a ambos (Pollard y Present (1948)):

$$\frac{1}{D_n} = \frac{1}{D_M} + \frac{1}{D_K}$$

También se debe tener en cuenta la tortuosidad del adsorbente y que el avance se ve obstruido por la fracción de adsorbente no disponible para difusión, así que flujo real es menor al cálculo teórico. En consecuencia, existe una difusividad efectiva (D_e) que se puede estimar por métodos experimentales (más fiables) o métodos empíricos como, por ejemplo:

$$D_e = \varepsilon \cdot \frac{D_n}{\tau}$$

Yang y Liu (1982) concluyen que para la mayoría de las estructuras porosas:

$$D_e \approx \frac{\varepsilon^2}{\tau}$$

En el caso de difusión intracristalina (en canales o estructuras cristalinas) como ocurre en adsorbentes de zeolita o sílice, el modelo debe representarse mediante una combinación de ecuaciones de difusión intracristalina y macroporos. Estos materiales tienen una estructura cristalina con aperturas a través de las que moléculas pequeñas pueden entrar y, mediante canales internos, llegar a cavidades con centros de adsorción dentro del sólido. La difusión en las zeolitas es relativamente lenta debido a la restricción en el acceso.

3) **La difusión superficial.**

Un posible escenario es que las moléculas adsorbidas dispongan de movilidad suficiente en la superficie del adsorbente y puedan desplazarse a otros centros de adsorción vacíos.

Este fenómeno ocurre en paralelo a la difusión en los poros discutida en el punto anterior cuando las fuerzas de atracción no son suficientemente fuertes como para impedir la movilidad del adsorbato. Es más probable que sea significativa en los adsorbentes porosos con una gran superficie y poros estrechos.

La variación del coeficiente de difusión superficial con la temperatura puede describirse mediante una ecuación análoga a la de Arrhenius:

$$D_s = D_0 \cdot e^{(-E_s/R \cdot T)}$$

Donde:

D_0 es el factor pre-exponencial de la difusión superficial (m^2/s). R es la constante de los gases ideales ($J/mol \cdot K$).

E_s es la energía necesaria para el salto de un centro de adsorción a otro (J/mol). T es la temperatura (K).

El flujo difusivo intramolecular total (\dot{m}_A), es entonces la suma de las difusiones Knudsen, molecular y superficial en la dirección z y viene dada por:

$$\dot{m}_A = - \left(D_e \cdot \frac{dc}{dz} + \rho_b \cdot D_s \cdot \frac{dq}{dz} \right) = -(D_e + \rho_b \cdot D_s \cdot K) \cdot \frac{dc}{dz} = -D_i \cdot \frac{dc}{dz}$$

Donde, K es la pendiente de la isoterma en el punto considerado (L/kg).

Como la difusión superficial es difícil de medir, se estima por exclusión midiendo experimentalmente el flujo total y restándole el flujo Knudsen y el flujo molecular calculado teóricamente o determinado experimentalmente.

Debido al calor liberado o absorbido durante el proceso de adsorción, el sistema de adsorbato-adsorbente puede no ser estrictamente isotérmico, por lo que en algunos casos será necesario estudiar las desviaciones del comportamiento isotérmico para saber si se puede suponer o no la temperatura estacionaria. Estas desviaciones dependen de las velocidades relativas de la transferencia de materia y la transferencia de calor.

Para poder estudiar la suposición isotérmica, primero hay que ver como se modeliza la velocidad de transmisión de calor en la adsorción. El transporte de calor se caracteriza por dos resistencias a su avance:

- 1) El transporte de calor hacia o desde la superficie exterior del sólido adsorbente a través de la fase fluida.
- 2) El transporte del calor de adsorción a través del sólido.

A continuación, se describirá brevemente cada una:

1) **El transporte de calor hacia o desde la superficie exterior del sólido adsorbente a través de la fase fluida.**

Análogamente al transporte de materia, se puede describir la transferencia de calor a través de la ley de Newton. Esta ley describe el calor mediante convección como el producto de un coeficiente de transmisión de calor por convección y una fuerza impulsora lineal. El coeficiente global de transmisión por convección (h) representa a la resistencia en sí mientras que la fuerza impulsora es la diferencia de temperaturas:

$$\dot{Q}_A = h \cdot (T^i - T)$$

Donde, T^i es la temperatura de la superficie del sólido y T la temperatura en el seno del fluido (K). Ya que la adsorción es casi siempre exotérmica, el calor se libera desde el interior del adsorbente y se transfiere desde la superficie del sólido al seno del fluido ($T^i > T$).

2) **El transporte del calor de adsorción a través del sólido.**

De nuevo, es análogo al transporte de materia y se puede describir el calor mediante conducción como el producto de un coeficiente de transmisión de calor por conducción y una fuerza impulsora lineal mediante la ley de Fourier. El coeficiente global de transmisión por conducción (k_e) representa a la resistencia en sí y la fuerza impulsora es la diferencia de temperaturas:

$$\dot{Q}_A = -k_e \cdot \frac{dT}{dz}$$

Donde, T es la temperatura (K).

Teniendo en cuenta que en el estado estacionario el transporte de materia y el transporte de energía intermolecular e intramolecular debe ser igual en la interfase:

$$\dot{m}_A = k_L \cdot (c - c^i) = D_i \cdot \left(\frac{\partial c}{\partial R} \right) \quad \text{en } R = R_p$$

$$\dot{Q}_A = h \cdot (T^i - T) = k_e \cdot \left(\frac{\partial T}{\partial R} \right) \quad \text{en } R = R_p$$

Definiendo las dos ecuaciones anteriores en una forma adimensional, escribiendo $\frac{c}{c^i} = y$, $\frac{T^i - T}{T^i - T} = \theta$ y $\frac{R}{R_p} = z$, se transforman a, respectivamente:

$$\frac{\left(\frac{\partial y}{\partial z}\right)}{(1-y)} = \frac{k_L \cdot R_p}{D_i} = Bi_m \quad \text{en } z = 1$$

$$\frac{\left(\frac{\partial \theta}{\partial z}\right)}{(\theta - 1)} = \frac{h \cdot R_p}{k_e} = Bi_h \quad \text{en } z = 1$$

En ambas ecuaciones, se observa que la relación entre las velocidades de transferencia intermolecular e intramolecular, tanto de la materia como de la energía, viene dada por el número de Biot Bi_m para la materia y el número de Biot Bi_h para el calor.

Cuando cualquiera de los números de Biot es grande, la mayor resistencia al proceso de transporte correspondiente se encuentra dentro del sólido poroso en lugar de en su exterior. Normalmente, la mayor resistencia al transporte de masa suele estar dentro del gránulo de adsorbente, mientras que la mayor resistencia a la transferencia de calor suele ser exterior al granulo, aunque en algunos casos de quimisorción la transferencia de calor en el interior del gránulo si se debe de tener en cuenta.

Por otro lado, se puede discutir la condición isotérmica en un lecho fijo de la siguiente forma:

- Caso 1 ($\dot{m}_A \approx \dot{Q}_A$):

Cuando el flujo de calor es similar al de materia, la “onda térmica” progresa a través del lecho más o menos a la misma velocidad que la zona de transferencia de materia (*MTZ*) y se puede esperar que prácticamente todo el calor liberado en la adsorción se retenga en la *MTZ*. Esto significa que no se debe hacer la suposición isotérmica a menos que el calor de la adsorción sea bajo y/o la concentración del componente adsorbible sea baja.

- Caso 2 ($\dot{m}_A > \dot{Q}_A$):

Si el flujo de calor es mucho menor al de materia, la onda térmica se queda atrás de la *MTZ* y por lo tanto el calor de la adsorción puede ser retenido en la porción de equilibrio del lecho (la zona saturada). Se puede llegar a asumir que la operación es isotérmica.

- Caso 3 ($\dot{m}_A < \dot{Q}_A$):

Por último, cuando el flujo de calor es mayor al de materia, la onda térmica avanza más rápido que la *MTZ* y el calor se elimina fácilmente de esta zona, por lo que es seguro usar la suposición isotérmica.

En el caso de la adsorción a partir de líquidos, el aumento en la temperatura acostumbra a ser relativamente pequeño y despreciable.

5.5.5. Adsorbentes

Para conseguir una buena viabilidad económica en las operaciones de adsorción a escala industrial es necesario que el material adsorbente tenga un volumen interno elevado, pues al existir más superficie interna, también existen más centros de adsorción para el componente que se extrae del fluido. A pesar de la elevada superficie interna requerida, como ya se ha comentado anteriormente, también es importante que el acceso a ella sea posible. Por lo tanto, es necesario que exista un compromiso en el tamaño de los poros, deben ser suficientemente grandes como para permitir la entrada del adsorbato, pero también suficientemente pequeños para proporcionar una alta superficie específica interna. Otras propiedades relevantes de los adsorbentes son la resistencia mecánica para mantener su integridad ante flujos altos o procesos de regeneración, la resistencia química para soportar condiciones extremas, la disponibilidad en el mercado o el precio.

Una de las cualidades más importantes que se debe tener en cuenta al elegir un adsorbente es la afinidad que presenta en el sistema concreto de interés. En apartados anteriores ya se ha dejado constancia de que la cinética y el equilibrio de la adsorción son unas ciencias complejas donde intervienen gran cantidad de variables y, por esta razón, lo más habitual es estudiar previamente los sistemas particulares adsorbente-adsorbato a escala laboratorio o piloto antes de seleccionar un adsorbente para uso industrial.

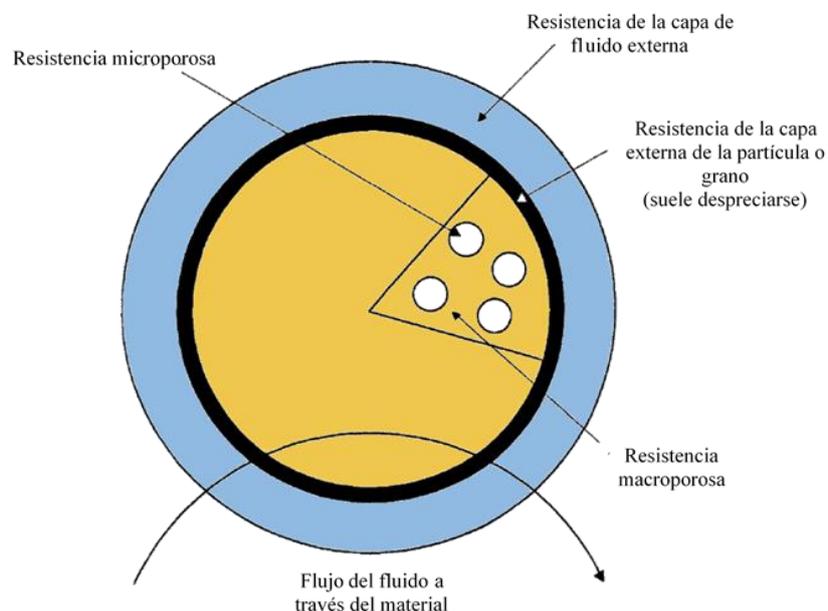


Figura 32: Esquema de la estructura de un adsorbente ideal.
(W. John Thomas and Barry Crittenden, 1998)

Las superficies adsorbentes suelen ser física y/o químicamente heterogéneas, y las energías de enlace pueden variar mucho de un sitio a otro. Se pueden fabricar adsorbentes con superficies internas de

entre 100 y 3000 m^2/g aunque, para aplicaciones prácticas, el rango se suele limitar entre 300 y 1200 m^2/g . Los adsorbentes no acostumbran a tener un tamaño de poro constante en toda su extensión, sino que lo más común es una superficie interna compuesta por poros de diversos tamaños. En la Figura 32 se puede observar la estructura idealizada de un adsorbente con las resistencias explicadas en el apartado 5.5.4. Cinética señaladas. Tal y como describe la imagen, Los sólidos diluidos en el fluido pasan a través de la película fluida externa del sólido y, en ese punto, entran en su estructura macroporosa para finalmente adentrarse en los microporos donde son adsorbidos y renombrados como adsorbato.

Muchos de los adsorbentes de uso más extendido, como los carbones activos, los geles de sílice y las alúminas son de estructura amorfa y contienen redes complejas de microporos, mesoporos y macroporos interconectados. En cambio, los adsorbentes zeolíticos (aluminosilicatos cristalinos), también muy usados, presentan un tamaño de poro preciso y con variaciones muy estrechas debido a la cristalinidad de su estructura. En la Tabla 13 se pueden observar algunos usos comunes de los adsorbentes más utilizados industrialmente.

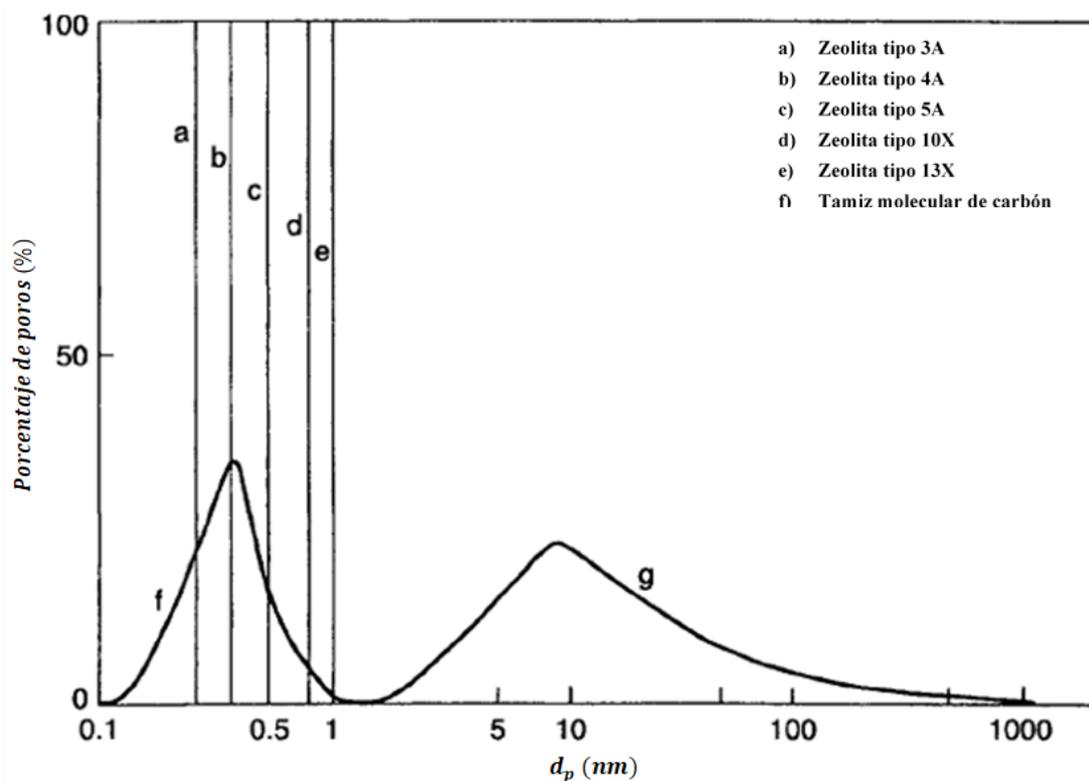


Figura 33: Ejemplos de distribución de tamaño de poro.
(W. John Thomas and Barry Crittenden, 1998)

El tamaño de poro puede ser caracterizado mediante una distribución de tamaños de poro en el caso de los adsorbentes amorfos (carbones activos, geles de sílice...) o, por valores precisos en el caso de los adsorbentes de estructura molecular cristalina (zeolitas). En la Figura 33 se puede observar un ejemplo de distribución de tamaños de poro para algunos adsorbentes comerciales.

Un ensayo típico para la determinación experimental de la distribución de tamaños de poro es a través de un ajuste de la isoterma de adsorción de nitrógeno (N_2) al modelo de BET a temperatura de nitrógeno líquido (77 K). Conociendo la cantidad de nitrógeno adsorbida se pueden determinar el volumen de poros de cada tipo y, en función de la presión a la que se trabaja, se establece un límite de diámetro de poro en el que ocurre la adsorción. De esta forma, mediante el uso de diferentes presiones en varios ensayos se puede caracterizar la distribución de tamaños de poro.

Tabla 13 Aplicaciones típicas de diversos adsorbentes comunes.
(W. John Thomas and Barry Crittenden, 1998).

Tipo de adsorbente	Aplicaciones típicas
<i>Gel de sílice</i>	Secado de gases, refrigerantes, disolventes orgánicos o/y aceites para transformadores Desecante en embalajes y vidrios dobles Control del punto de rocío del gas natural
<i>Alúmina activada</i>	Secado de gases, disolventes orgánicos o/y aceites para transformadores Eliminación del HCl del hidrógeno Eliminación del flúor y de los compuestos de boro y flúor en el proceso de alquilación
<i>Carbón activo</i>	El nitrógeno del aire Hidrógeno de los procesos de syn-gas e hidrogenación Etileno de metano e hidrógeno El monómero de cloruro de vinilo (VCM) del aire Eliminación de olores de los gases Recuperación de los vapores de disolventes Eliminación de SO_x y NO_x Purificación del helio Limpieza de los gases nucleares Decoloración de jarabes, azúcares y melazas Purificación del agua, incluida la eliminación del fenol, los compuestos hidrogenados, los plaguicidas, la caprolactama y el cloro
<i>Zeolitas</i>	El oxígeno del aire Secado de los gases Eliminar el agua de los azeotrópicos Endulzando los gases y líquidos agrios Purificación del hidrógeno Separación de amoníaco e hidrógeno Recuperación del dióxido de carbono Separación de oxígeno y argón Eliminación de acetileno, propano y butano del aire Separación de xilenos y etilbenceno Separación de las parafinas normales de las parafinas ramificadas

	<p>La separación de las olefinas y los aromáticos de las parafinas</p> <p>Recuperación del monóxido de carbono del metano y el hidrógeno</p> <p>Purificación de los gases nucleares</p> <p>Secado de refrigerantes y líquidos orgánicos</p> <p>Separación de sistemas de disolventes</p> <p>Purificación de silanos</p> <p>Control de la contaminación, incluyendo la eliminación de Hg, NO_x y SO_x de los gases</p> <p>Recuperación de la fructosa del jarabe de maíz</p>
<i>Polímeros y resinas</i>	<p>Purificación del agua, incluyendo la eliminación de fenol, clorofenoles, cetonas, alcoholes, aromáticos, anilina, indeno, aromáticos polinucleares, nitro y cloro-aromáticos, PCBs, pesticidas, antibióticos, detergentes, emulsionantes, agentes humectantes, kraftmill, efluentes, colorantes</p> <p>Recuperación y purificación de esteroides, aminoácidos y polipéptidos</p> <p>La separación de los ácidos grasos del agua y el tolueno</p> <p>Separación de los aromáticos de los alifáticos</p> <p>Separación de la hidroquinona de los monómeros</p> <p>Recuperación de proteínas y enzimas</p> <p>Eliminación de los colores de los jarabes</p> <p>Eliminación de orgánicos del peróxido de hidrógeno</p>
<i>Arcillas (tratadas con ácido y en píldoras)</i>	<p>Tratamiento de aceites comestibles</p> <p>Eliminación de pigmentos orgánicos</p> <p>Refinado de aceites minerales</p> <p>Eliminación de bifenilos policlorados (PCBs)</p>

Otra forma típica de caracterizar la porosidad de un adsorbente es mediante la porosimetría de mercurio. Esta técnica consiste en, mediante una alta presión, introducir forzosamente el mercurio en la estructura porosa del adsorbente. De nuevo, en función de la presión a la que se fuerce la entrada del mercurio se consiguen llenar poros de un diámetro proporcional. Repitiéndolo para varias presiones se puede obtener una curva presión-volumen a partir de la que se puede determinar la distribución de tamaños de poro.

Los adsorbentes comerciales se suelen obtener sintéticamente en laboratorios ya que en la naturaleza no se dan las condiciones para crear sólidos con estas exigencias de porosidad excepto en el caso de algunos tipos de zeolitas. Las materias primas y los métodos de producción de adsorbentes deben ser baratos para que la viabilidad económica de la adsorción no decaiga ante otros procesos de separación alternativos.

Una propiedad característica de un material adsorbente es la selectividad relativa. La selectividad relativa (α_{AB}) es un factor adimensional que expresa la capacidad de adsorción para un adsorbato A respecto de otro adsorbato B . Es la forma más sencilla de describir un equilibrio de adsorción multicomponente y en aplicaciones prácticas se puede definir de la siguiente forma:

$$\alpha_{AB} = \frac{\frac{X_A}{Y_A}}{\frac{X_B}{Y_B}}$$

Siendo X_A e Y_A las fracciones molares del componente A en las fases adsorbida (sólido) y fluida respectivamente en el equilibrio. En el caso del subíndice B , lo mismo, pero para el componente B . Otra forma de representar este parámetro para concentraciones bajas es mediante el cociente de las pendientes de las isotermas individuales, es decir, mediante el cociente de las constantes de Henry, obviamente solo en caso de que se pueda acoplar el modelo lineal de adsorción en el sistema.

Es relevante remarcar que existe una alta variedad de materiales adsorbentes con propiedades muy diversas y que cada uno tiene aplicaciones específicas dado que funciona mejor para unos contaminantes u otros. En cada proceso industrial en el que hay una adsorción involucrada es importante seleccionar previamente el adsorbente óptimo mediante un escrutinio en el laboratorio. La característica más estudiada para la selección de un adsorbente es la isoterma de equilibrio en los rangos de temperatura y presión de interés. En la mayoría de los casos, se debe obtener experimentalmente puesto que el proveedor no la proporciona. Las isotermas para las especies puras proporcionan una medida de la idoneidad de un adsorbente para una separación determinada, pero hay que tener cuidado al interpretar la información cuando se va a adsorber más de un compuesto, aunque no sea intencionadamente.

Aunque la gran mayoría de procesos de adsorción son controlados por el equilibrio, es posible que sea necesario determinar la cinética del proceso para asegurar que la velocidad sea adecuada y se pueda llegar a la separación necesaria en una configuración de proceso en continuo.

En gran parte de las aplicaciones, una vez el sólido se encuentra saturado de adsorbato, se lleva a cabo una regeneración en la que se separa el componente adsorbido del material adsorbente para poder reutilizar el adsorbente de nuevo en otro ciclo de adsorción. Para el éxito de esta operación se necesita que el proceso de adsorción sea reversible y que las propiedades mecánicas y de adsorción no se vean comprometidas. La regeneración puede efectuarse cambiando la presión y/o la temperatura o mediante alguna otra alteración física o química del sistema, pero en la mayoría de los casos prácticos no es completa y suele quedar una concentración residual de adsorbato en el sólido que es muy difícil de extraer.

En definitiva, las características que definen a un adsorbente son la capacidad de adsorción (equilibrio de adsorción), la selectividad hacia determinados adsorbatos, sus propiedades mecánicas y químicas, su facilidad de regeneración, la cinética de adsorción y su coste.

5.5.5.1. Carbón activo

El carbón activo es una forma amorfa del carbón que, gracias a un proceso industrial de activación, presenta una estructura altamente porosa. Existen gran cantidad de patentes para su fabricación dependiendo de las materias primas utilizadas y de los métodos empleados para la activación. La materia prima puede ser carbón bituminoso, carbón de leña, cascara de almendra, arroz o coco, turba, lignina, madera, residuos de refinerías y otros materiales orgánicos con alta cantidad de carbono.

Existen dos procesos para la activación del carbón, la activación física o con gases y la activación química:

- El proceso de activación física implica un precalentamiento de 400 a 500 °C en ausencia de aire para eliminar los compuestos volátiles y formar pequeños poros. A continuación, ocurre la activación como tal mediante la acción de un gas como, por ejemplo, vapor de agua a una temperatura de entre 800 y 1000 °C, aunque se pueden utilizar otros como el dióxido de carbono (CO_2) o gases de combustión.
- La activación química, en cambio, consiste en una deshidratación mediante cloruro de zinc ($ZnCl_2$), ácido sulfúrico (H_2SO_4) o ácido fosfórico (H_3PO_4) para producir un carbón activado directamente a partir de la materia prima. En este caso las temperaturas de trabajo oscilan de 200 a 650 °C, pero los poros tienden a ser más grandes.

La estructura molecular de los carbones activados es muy similar a la del grafito. Consiste en una red tridimensional de átomos de carbono dispuestos en microestructuras cristalinas. Cada microcristal está formado por una serie de anillos aromáticos enlazados entre sí de forma irregular en capas apiladas aproximadamente paralelas entre sí. Se pueden encontrar entre 5 y 15 capas en cada microcristal con una separación de 3,4 Å entre ellas. En la Figura 34 se puede observar un ejemplo de la estructura molecular descrita y una comparación con la estructura del grafito.

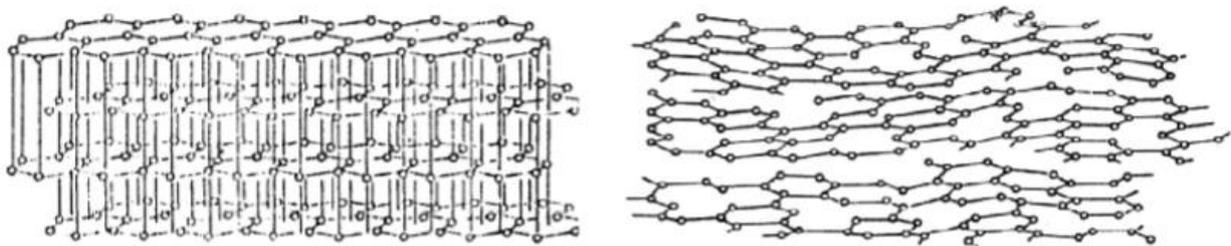


Figura 34: Esquema representativo de la estructura del grafito en comparación con la propuesta para el carbón activo. (González Navarrete , 2017)

Debido a que los microcristales que constituyen la estructura no están perfectamente unidos, existen huecos y espacios vacíos que aumentan drásticamente el área superficial interna de estos carbones y,

por ello, son utilizados habitualmente como adsorbentes. El área superficial de la mayoría de los carbones activados comerciales está entre 500 y 1500 m^2/g .

A pesar de que es un adsorbente de poca selectividad por moléculas concretas, debido a la naturaleza apolar de su estructura, retiene preferentemente moléculas apolares orgánicas.

Cabe señalar que los carbones activos no están únicamente compuestos por átomos de carbono, sino que existen otros elementos minoritarios como los heteroátomos (hidrógeno, oxígeno, nitrógeno, azufre...) que también forman parte de su estructura. Mientras que el hidrógeno se encuentra unido a los átomos de carbono de las capas superficiales del sólido, otros elementos como el oxígeno, el nitrógeno o el azufre pueden ubicarse tanto en esas posiciones externas, como en el interior de la estructura.

Aunque todos los elementos influyen en las propiedades del carbón activo, la mayor influencia proviene de los grupos funcionales ubicados en los bordes del material, en especial de los que contienen oxígeno, ya que al aparecer ciertos grupos funcionales polares se puede conseguir la adsorción de moléculas apolares que, según la apolaridad estructural teórica del carbón, no deberían ser retenidas en principio. Una de las razones por las que ocurre este fenómeno es debido a que la alta electronegatividad del oxígeno provoca momentos dipolares en los grupos funcionales que lo contienen. Este fenómeno es de singular importancia para sistemas que utilizan disolventes polares como el agua, ya que se puede contrarrestar el carácter hidrófobo general de los carbones aumentando su mojabilidad y su hidrofilia. También es importante tener en cuenta que en estos casos los disolventes polares se adsorben competitivamente en los sitios de los grupos superficiales de oxígeno y, en el caso del agua, a su vez se adhieren nuevas moléculas de agua por formación de puentes de hidrógeno (véase la Figura 35). A pesar de que en la adsorción de compuestos inorgánicos en fase acuosa esto podría resultar beneficioso, en el caso de adsorber compuestos en fase gas, el hecho de que los poros estén ocupados, o incluso bloqueados, por moléculas de agua puede llegar a disminuir sustancialmente la capacidad adsortiva del carbón, por esta razón es importante analizar la cantidad de oxígeno superficial de los carbones activos.

En la Figura 36 se pueden ver ejemplos de grupos funcionales con oxígeno fácilmente ubicables en las superficies de los carbones activos. Los carbonos nunca están libres de oxígeno, excepto en circunstancias extremas de almacenaje al vacío después de haber sido calentados a 950 °C. La polarización superficial del carbón activo también puede ser provocada a propósito si es necesario mediante oxidación superficial por calentamiento con el aire a unos 300 °C o mediante tratamientos químicos con ácidos, como el ácido nítrico (HNO_3), o con peróxido de hidrogeno (H_2O_2).

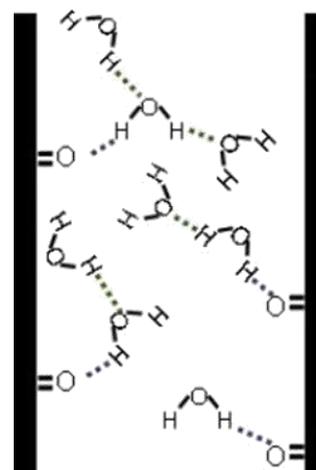


Figura 35: Representación de un poro y de los puentes de hidrógeno de las moléculas de agua.
(Manual del Carbón Activo)

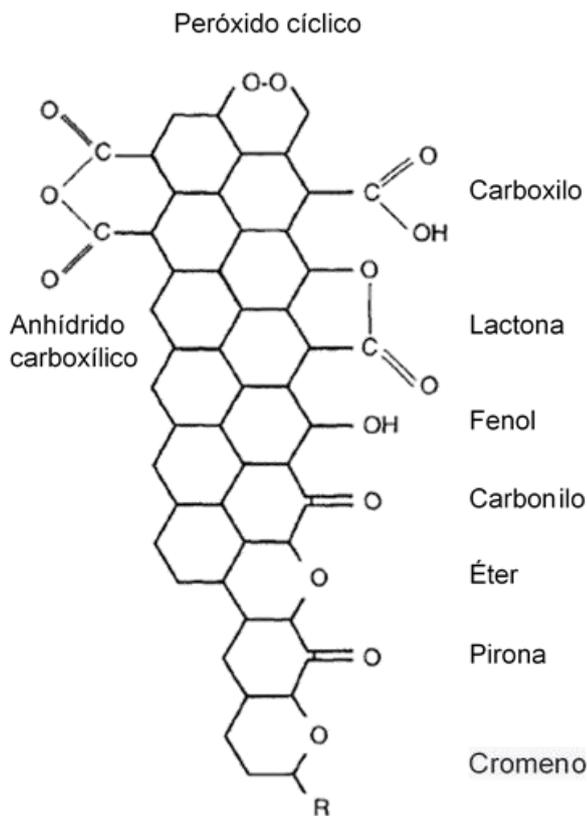


Figura 36: Ejemplo de grupos funcionales con oxígeno en superficies carbonosas.
(Manual del Carbón Activo)

Además de elevar la afinidad por las moléculas polares, la presencia de hidrogeno y oxígeno superficial también puede dotar de un carácter acido-base al carbón. En la superficie del carbón coexisten grupos superficiales de carácter ácido y de carácter básico, la proporción y la fuerza de estos grupos definen el comportamiento global del carbón activo, es decir, si es ácido o básico. Debido a lo descrito, se puede decir que el carbón activo puede comportarse como un anfótero y, de forma intuitiva, se puede deducir que un carbón de tipo básico será preferible para la adsorción de compuestos ácidos y viceversa.

Mientras que los grupos ácidos tienden a liberar protones (H^+), especialmente en los medios básicos, los grupos básicos tienden a captarlos cuando se encuentran en un medio ácido. De forma genérica, si el pH es mayor al pH de carga cero del carbón hay un predominio de las cargas negativas, mientras que si el pH es menor, la superficie se encuentra cargada

positivamente. Una carga neta negativa es preferible para adsorber cationes y una positiva para adsorber aniones.

Dado que modificar el pH de los efluentes contaminantes no siempre resulta sencillo, es preferible optimizar la química superficial del carbón activo teniendo en cuenta los criterios anteriores para que la adsorción sea óptima. Se debe de tener especial cuidado al manipular la química superficial de un carbón activo ya que puede estar interrelacionada con características de su porosidad. Por ejemplo, un aumento en la cantidad de grupos superficiales oxigenados puede modificar la porosidad del carbón, bloqueado parte de los microporos y disminuyendo la accesibilidad al sistema poroso o, un tratamiento térmico a alta temperatura para eliminar grupos superficiales puede también acabar produciendo un colapso, disminuyendo también el volumen de poros.

Por lo tanto, en conclusión, se pueden identificar dos tipos de superficies en los carbones activos:

- La superficie planar no polar que comprende la mayor parte de la superficie activa del carbón con una estructura formada por el sistema electrónico π de anillos aromáticos del grafito.
- La superficie correspondiente a los extremos o bordes de los planos gráfiticos que forman los microcristales. En estos extremos se encuentran toda una serie de grupos funcionales orgánicos con o sin oxígeno que aportan ciertas propiedades de interacción superficial al carbón.

En función de la materia prima y del proceso de activación se consigue una distribución de tamaños de poros determinada, lo que permite una oferta bastante variada en el mercado. Mientras que en las aplicaciones para adsorción de gases se tiende a buscar una distribución amplia donde convivan todos los tipos de poros, en las aplicaciones con líquidos la tendencia es utilizar tamaños de poro mayores (3 *nm* o más). Además, en este caso, otra propiedad a tener en cuenta es el índice de mojado para conseguir una interacción mayor entre adsorbente y fluido.

El volumen que ocupan los poros es típicamente del orden de 0,3 cm^3/g y las porosidades se suelen definir con base en la adsorción de algunas especies como el yodo, el azul de metileno, el benceno, el cloruro de carbono, el fenol o la melaza. Las cantidades adsorbidas de estas sustancias en diferentes condiciones dan lugar a parámetros que cuantifican la porosidad como son el número de yodo u otros. Los números de yodo, azul de metileno y melaza están correlacionados con poros superiores a 1, 1,5 y 2,8 *nm* respectivamente.

Otras propiedades relevantes de los carbones activados son la eliminación de concentraciones residuales de agentes oxidantes como cloro y ozono, el punto de inflamación (relevante para controlar la regeneración) o el contenido en cenizas. Algo importante también es que el posible autocalentamiento de los lechos de carbón activo en ciertas condiciones puede provocar el inicio de incendios.

Tras el proceso de activación, el carbón activo se puede dividir en diferentes tamaños con diferentes capacidades de adsorción. Los dos tipos habituales son el carbón activo en polvo, con diámetro menor al tamiz de 200 y el carbón activo granular, con diámetro superior a los 0,1 *mm*. Su distribución está normalizada mayoritariamente en formato de grano y en polvo. Tanto en polvo (PAC) como granulado (GAC) su mayor uso es en el tratamiento de aguas residuales:

- **Carbón activo en polvo (PAC)**

Cuando se utiliza en polvo se agrega con alimentadores automáticos directamente a las unidades de tratamiento biológico o a los decantadores primarios. Después de un tiempo de contacto adecuado, se elimina por sedimentación con la posible ayuda de coagulantes o por filtración. No suele ser económico regenerarlo y el carbono gastado generalmente se desecha.

- **Carbón activo en grano (GAC)**

El formato granular se utiliza en filtros y cartuchos desechables en instalaciones industriales, comerciales y residenciales cuando hay un problema persistente de sabor y/u olor, aunque lo más habitual es su uso en columnas de relleno. Las columnas pueden ser de flujo ascendente o descendente, en el primer caso se adsorben compuestos orgánicos, mientras que el segundo también se filtran los sólidos en suspensión (pueden ser necesarios contralavados para evitar caídas de presión graves). Estas columnas pueden funcionar en serie o en paralelo. El carbón activo

granular para el uso en lechos fijos tienen tamaños de partículas típicos en el rango de 0,4 a 2,4 mm.

Otras formas menos habituales de usar el carbón activo son mediante telas de carbón activado constituidas por una tela tejida a base de celulosa o, mediante formas monolíticas en aplicaciones de baja caída de presión o para almacenar gas natural. A pesar de que la configuración en telas puede permitir una mejor cinética de adsorción que la forma granular, es más cara.

La viabilidad de utilizar métodos de adsorción con carbón activo en muchas ocasiones depende directamente de la posibilidad de regenerar y recuperar de una forma eficaz el adsorbente una vez agotada su capacidad de adsorción. La regeneración suele realizarse mediante un proceso térmico que dura alrededor de 30 minutos. El carbón agotado se extrae de la columna de adsorción como un lodo que, se deshidrata y se traslada a un horno rotatorio donde se trata térmicamente en condiciones controladas y con un contenido limitado en oxígeno para evitar la combustión. Este tratamiento elimina el agua residual y volatiliza los compuestos orgánicos oxidados. Al finalizar, el carbono se enfría con agua, se lava y se repone. Cabe señalar que a lo largo de este proceso es inevitable la pérdida de parte del carbón activo (del 2 al 10% en peso) y puede ser necesario suministrar carbón activo “virgen” para compensar las pérdidas. Obviamente esta regeneración es para fenómenos de adsorción física reversibles, en el caso de la quimisorción el proceso puede presentar más complicaciones.

5.5.5.2. Adsorción de boro en carbón activo

La adsorción mediante carbón activo es una de las formas más eficientes y económicas de eliminar impurezas del agua, sobre todo, cuando el contaminante se encuentra en concentraciones bajas. La restricción en el caso del boro es el rendimiento de la eliminación y por eso la adsorción no suele ser un tratamiento común para la eliminación del boro en aguas residuales y no existen muchos datos ni de equilibrio termodinámico, ni de la cinética de adsorción

Según la bibliografía (LJ. V. Rajaković, M. DJ, Ristić, 1996), aunque la adsorción del boro en adsorbentes carbonosos comerciales es bastante baja, se puede incrementar mediante la impregnación de estos con los reactivos adecuados, siendo posible incluso llegar a triplicar la cantidad de boro adsorbida. En el estudio llevado a cabo por Rajaković y Ristić se examinó el uso de impregnaciones con ácido tartárico ($C_4H_6O_6$), entre otras sustancias, como una forma significativa de aumentar la eliminación del boro en forma de ácido bórico (H_3BO_3) y de borax ($Na_2B_4O_7 \cdot 10 H_2O$) en tratamientos de adsorción con carbón activo granular.

Las isotermas de adsorción del ácido bórico y el bórax en carbón activo se pueden ver en la Figura 37. Para obtener estas isotermas se prepararon 2,5 dL de diversas disoluciones de boro a partir de ácido bórico y bórax (rango de 0,23 – 0,94 mol/L) y se realizó durante 2 horas el mezclado continuo con

1 g de carbón activo. Pasado ese tiempo se tomaron muestras de 1 cL y fueron examinadas mediante diversos métodos para determinar la cantidad adsorbida. El mejor ajuste de estos datos fue obtenido con el modelo de isoterma de Langmuir (véase la Tabla 12 para más información) y los valores característicos para el rango de concentración especificado se enumeran en la Tabla 14, tanto para el caso del ácido bórico, como para el borax.

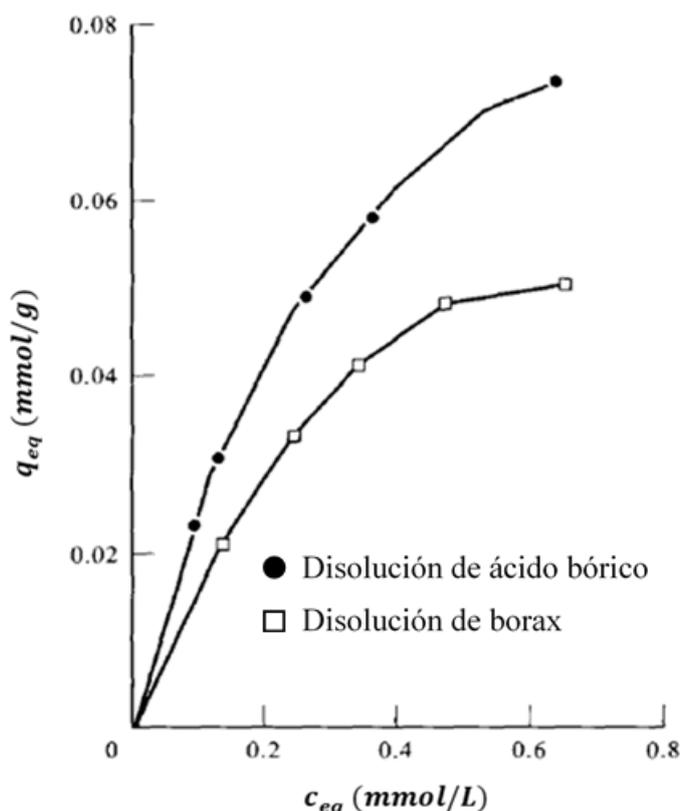


Figura 37: Isotermas de adsorción boro-carbón activo. (T = 22 °C, m_b = 1g) (LJ. V. Rajaković, M. DJ, Ristić, 1996)

Tabla 14: Constantes de Langmuir para la adsorción de ácido bórico y borax en carbón activo. (LJ. V. Rajaković, M. DJ, Ristić, 1996)

Compuesto	q_m (mmol/g)	K_L (L/mol)
Ácido bórico	0,113	992,6
Borax	0,154	1219

Que el carbón activo aparentemente adsorba más boro en forma de bórax que de ácido bórico se justifica con los diferentes valores de pH entre las disoluciones estudiadas. Mientras que la disolución de ácido bórico tiene pH 6, la disolución de borax tiene de 9,4. Como ya se ha indicado en el punto 5.4.2. El boro en medio acuoso, a pesar de que las formas inorgánicas del boro más habituales en disolución acuosa son el ácido bórico (H_3BO_3) y los iones borato, en concreto, el tetrahidroxiborato ($B(OH)_4^-$), a diferentes valores de pH se presentan diferentes compuestos de boro en las disoluciones acuosas. La distribución entre estos componentes depende tanto de la constante de disociación ácida del ácido bórico, como del pH del agua, así pues, a valores de pH elevados las especies borato existen como iones simples, monoméricos y univalentes, en contraste con las estructuras cargadas y polivalentes que adoptan a valores de pH más bajos. Por lo tanto, la diferencia entre ambas isotermas debe atribuirse a la mayor afinidad del carbón activo por los iones monoméricos y univalentes que hacia las estructuras polivalentes o, en otras palabras, estos datos demuestran que mediante la subida del pH se puede conseguir incrementar la adsorción de compuestos de boro.

En este estudio la impregnación se realiza mediante contacto directo del impregnante y el adsorbente durante un periodo largo de tiempo. Se sumergieron 100 g de GAC en 500 mL de una disolución de ácido con concentración de 1 mol/L durante 24 h y, después de ese tiempo, se extrajo el líquido sobrenadante mediante una decantación simple y el líquido restante mediante lavados con decantaciones consecutivas durante 2 h. La cantidad adsorbida se puede deducir de la diferencia de concentraciones entre la disolución original y una muestra de la disolución resultante.

El análisis de las diferentes impregnaciones se hizo en un sistema dinámico de adsorción compuesto por una columna cromatográfica de 20 mm de diámetro interior, 72,34 mm de altura y rellena con 10 g de adsorbente GAC tipo K-81/B (propiedades en el apartado Adjuntos de los antecedentes de los Anexos). Para cada uno de los ensayos se hizo circular a temperatura ambiente (22 °C) una disolución de boro a un flujo de 0,1 L/h y se recogió el efluente en fracciones de 0,1 L para analizar el contenido en boro de cada una de estas muestras. El caudal de agua mantuvo una concentración en boro constante en la entrada de la columna y el experimento se llevó a cabo hasta que en la salida ya no se detectase eliminación alguna.

Los resultados del estudio fueron favorables para el carbón impregnado de ácido tartárico y cítrico. Al parecer, La causa de la mayor captación en estos casos es debida a la formación de complejos organoboro ente las sustancias impregnadas al carbón activo y los compuestos de boro. Estos complejos organoboro son enlaces que se forman entre los compuestos de boro y el ácido tartárico y cítrico, y corresponden a la tendencia del boro para formar complejos con el oxígeno de la que ya se venía hablando en la última parte del punto 5.4.2. El boro en medio acuoso. Así, se concluyó que la actividad superficial de un carbón activo es mayor cuando este está impregnado por estas sustancias porque se aprovecha la tendencia del boro a la complejación con compuestos orgánicos que tienen dos o más grupos hidroxilos adyacentes.

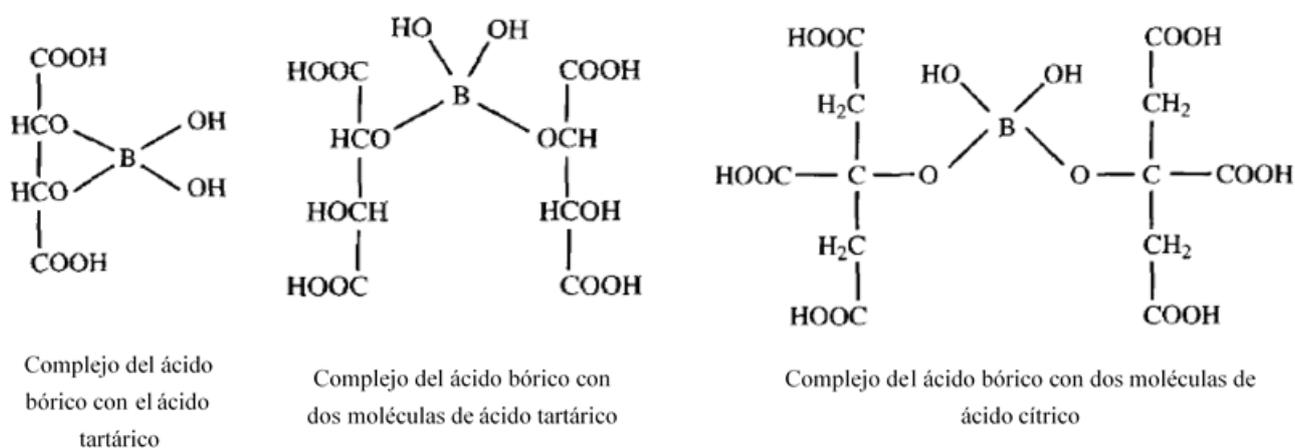


Figura 38: Complejos organoboro con el ácido tartárico y el ácido cítrico.
(LJ. V. Rajaković, M. DJ, Ristić, 1996)

Por lo tanto, quedó demostrado que la impregnación de un carbón activo granulado comercial con ácido tartárico o cítrico consigue favorecer la adsorción química de compuestos de boro mediante la formación de complejos como los descritos en la Figura 38. Como se puede observar en las estructuras moleculares superiores, los complejos formados con el ácido tartárico pueden contener una única molécula o dos de esta sustancia, mientras que para el caso de la impregnación con ácido cítrico la complejación implica obligatoriamente dos moléculas, esta podría ser una de las razones por las que la impregnación con el ácido tartárico da mejores resultados.

En la Tabla 15 se pueden observar los resultados exactos obtenidos de los experimentos que se llevaron a cabo con las impregnaciones ácidas en este estudio y en la Figura 40 y la Figura 39 se pueden ver las curvas de ruptura monitorizadas en cada uno de los casos.

Tabla 15: Resultados del experimento del estudio de Rajakovíc y Ristíc.
(LJ. V. Rajakovíc, M. DJ, Ristíc, 1996)

Contaminante	GAC	pH	c_0 (mg/L)	Cantidad adsorbida q_{eq} (mg/g)	V (L)
<i>Ácido bórico</i>	GAC de coco tipo K-81/B	6,1	100	1,59	0,6
	GAC de coco tipo K-81/B impregnado de ácido tartárico			3,56	
	GAC de coco tipo K-81/B impregnado de ácido cítrico			2,9	
<i>Borax</i>	GAC de coco tipo K-81/B	9,4	28	0,29	0,9
	GAC de coco tipo K-81/B impregnado de ácido tartárico			1,11	
	GAC de coco tipo K-81/B impregnado de ácido cítrico			1,21	

En conclusión, un pH alto en el agua (≥ 9) y una impregnación de ácido cítrico o ácido tartárico en el GAC puede conseguir aumentar la viabilidad y, por tanto, la competitividad de los tratamientos de adsorción con carbón activo en la depuración de caudales ricos en compuestos de boro.

Cabe señalar que no se han podido encontrar muchos más datos concluyentes respecto a la adsorción de boro en GAC y, aunque este estudio aporta curvas de ruptura para dos casos particulares y valores del equilibrio dinámico de adsorción, probablemente tengan que ser corregidos con un factor numérico para configuraciones de mayor cantidad de GAC o con otras peculiaridades. Aun así, estos datos son de alta utilidad y sirven para sentar una base.

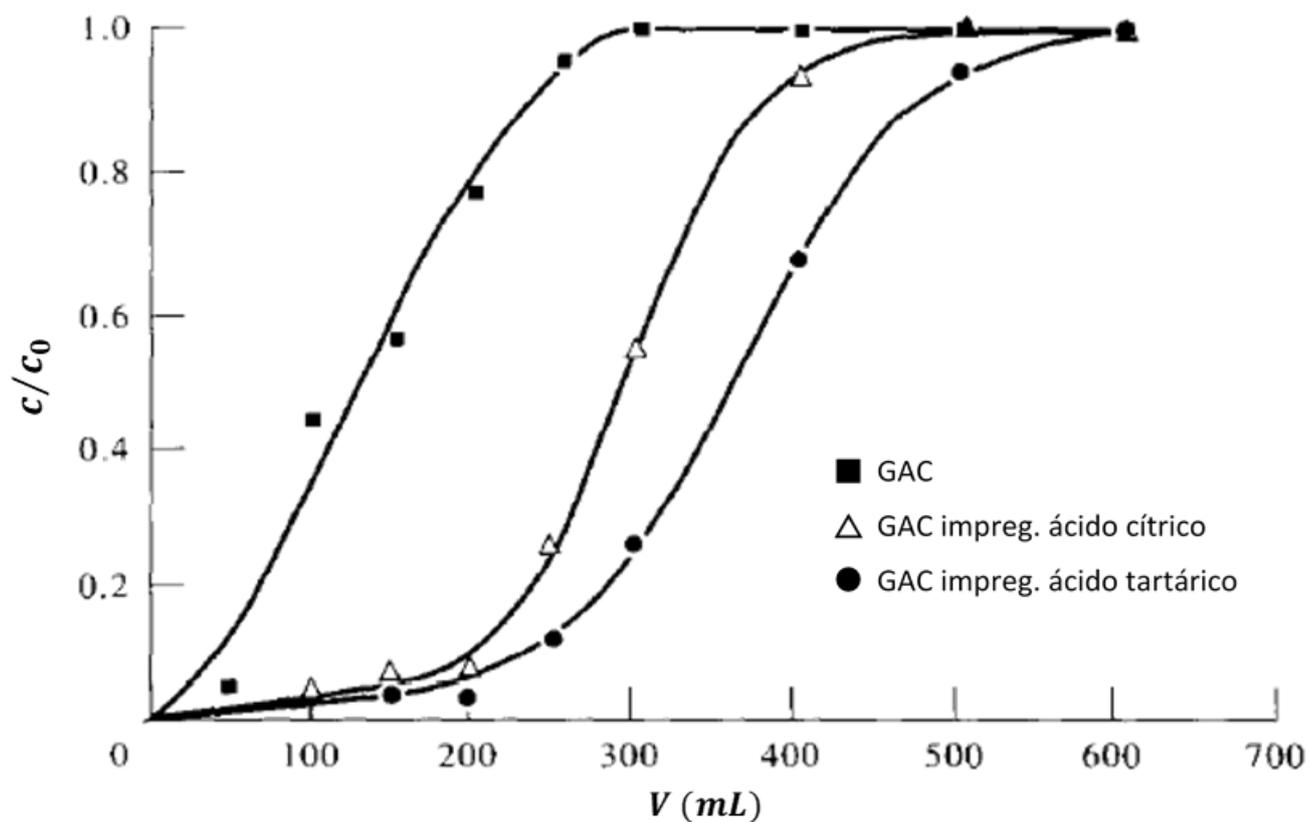


Figura 39: Curvas de ruptura del boro a partir de una disolución acuosa de ácido bórico ($T = 22\text{ }^\circ\text{C}$, $c_{\text{Boro } 0} = 100\text{ mg/l}$, $m_b = 10\text{ g}$, $\text{pH} = 6,1$) (LJ. V. Rajaković, M. DJ, Ristić, 1996).

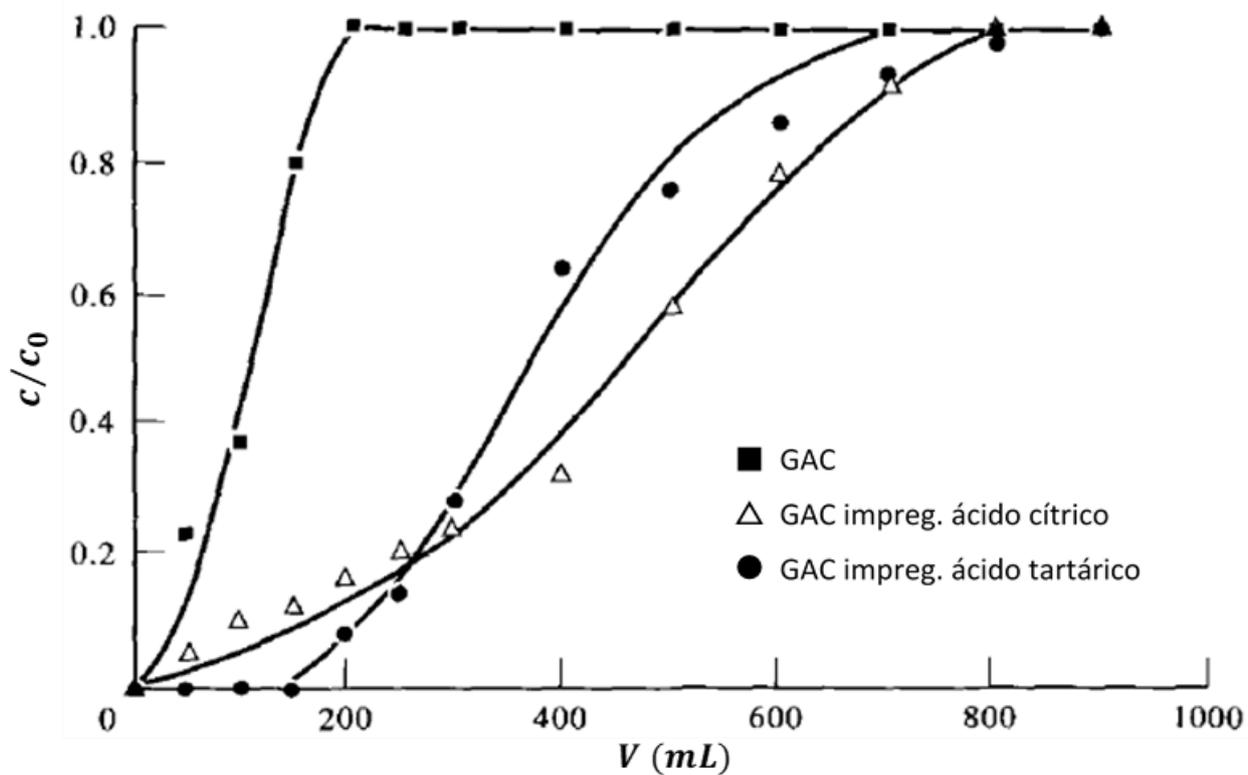


Figura 40: Curvas de ruptura del boro a partir de una disolución acuosa de borax ($T = 22\text{ }^\circ\text{C}$, $c_{\text{Boro } 0} = 28\text{ mg/l}$, $m_b = 10\text{ g}$, $\text{pH} = 9,4$) (LJ. V. Rajaković, M. DJ, Ristić, 1996).

5.5.6. Tecnología de las unidades de adsorción

Los dispositivos industriales empleados para llevar a cabo el proceso de adsorción son muy diversos debido a que dependen del tipo de proceso en el que se incorporan y deben adaptarse a la naturaleza y características de los adsorbentes y adsorbatos en cada sistema particular. Las técnicas utilizadas incluyen tanto los métodos por etapas como los de contacto continuo; estos se aplican en operaciones por lotes, continuas, o semicontinuas. A continuación, se describen algunas de los dispositivos más habituales en el área de los procesos de depuración de aguas residuales por adsorción:

- **Tanques agitados de contacto:**

Para los adsorbentes de diámetros muy pequeños se suelen emplear tanques agitados. El sistema más sencillo con esta disposición consta de un tanque en el que se mantiene en contacto el agua residual con el adsorbente con agitación continua, generalmente, mediante la acción de vapor caliente para aumentar la velocidad del proceso. El tiempo de contacto es una importante variable de diseño que se suele determinar a partir de las isoterms obtenidas en experimentos de laboratorio o de planta piloto para cada caso concreto. Una vez alcanzado ese tiempo, se procede a separar ambas fases mediante filtración y/o sedimentación.

El empleo de carbón activo en polvo acostumbra a ser lo habitual en esta configuración para aguas residuales. La regeneración no suele incorporarse para estos sistemas debido a las grandes e inevitables pérdidas de materia en el carbón, aun así, si se realiza suele ser mediante un proceso térmico.

A pesar de que, como ya se ha indicado con anterioridad en el apartado 5.5.2. Dinámica, la adsorción en la mayoría de los casos disminuye al aumentar la temperatura, la mayor viscosidad del líquido resulta aumentar la rapidez de difusión del soluto y la facilidad con la que puede moverse el adsorbente a través del seno líquido. Por esta razón trabajar a temperaturas altas suele estar justificado pues se hace preferible la mayor rapidez de equilibrio que la mayor cantidad adsorbida. Ya que generalmente la cantidad de fluido es mucho mayor que la cantidad adsorbida se puede ignorar el desprendimiento del calor por adsorción. Cuando la temperatura no afecta a las sustancias presentes, incluso se puede trabajar en el punto de ebullición del fluido.

Aunque en algunos casos lo más sencillo es una dinámica discontinua y no es necesario aumentar la complejidad del sistema, existen diversos sistemas que permiten llevar a cabo esta operación en semicontinuo. Por ejemplo, en la Figura 41 se puede ver el diagrama de flujo de un sistema de tratamiento de aguas residuales mediante adsorción en continuo en el que se efectúa el proceso en contracorriente mediante la utilización de un sistema mixto mezclador-separador de 2 pasos.

Con esta configuración, una vez se alcanza el equilibrio en el primer tanque con el adsorbente recuperado de la fase posterior, el agua circula al segundo tanque y se pone en contacto con

adsorbente nuevo que consigue eliminar los contaminantes restantes del agua. Este sistema consigue aprovechar más la capacidad del adsorbente al circular este en contracorriente al agua. Aunque solo se ha detallado un modelo de 2 pasos, este tipo de sistema puede expandirse en más pasos e incluso incorporar recirculaciones o flujos de adsorbente nuevo, entre otras modificaciones. En las operaciones con esta dinámica semicontinua puede ser necesario determinar experimentalmente los tiempos de contacto óptimos para eliminar los contaminantes del agua.

Esquema de funcionamiento:

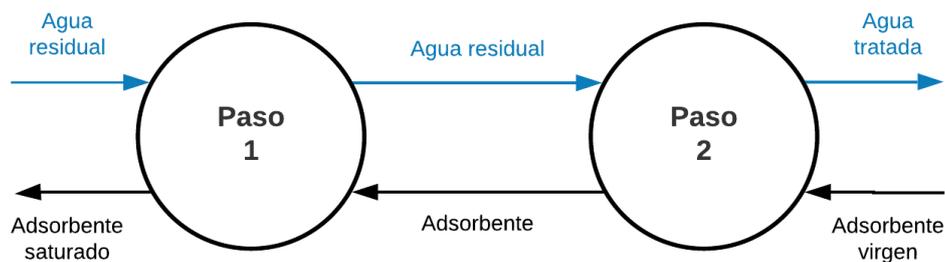


Diagrama de flujo:

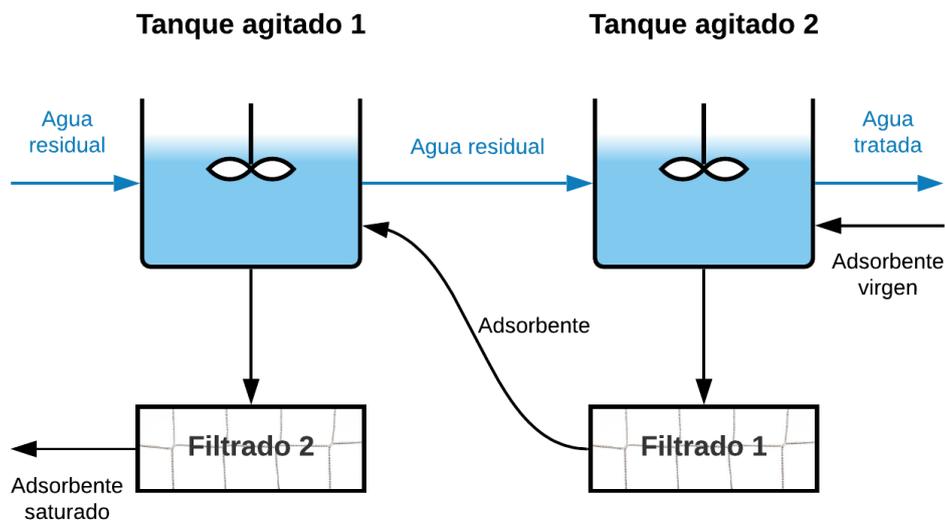


Figura 41: Sistema continuo de adsorción en contracorriente mediante la utilización de un sistema mixto mezclador-separador de 2 pasos.

- **Lechos fijos de contacto:**

Cuando se trata de adsorbentes es grano, es decir, de mayor tamaño, resulta más eficiente hacer pasar el agua residual a través de un lecho de adsorbente en lugar de introducir el adsorbente directamente en el agua residual. Estos lechos normalmente se disponen dentro de columnas huecas para que el fluido circule por los canales huecos creados entre los granos. A continuación, en la Figura 42 se muestra cómo se propaga el frente de adsorción en un lecho de flujo descendiente.

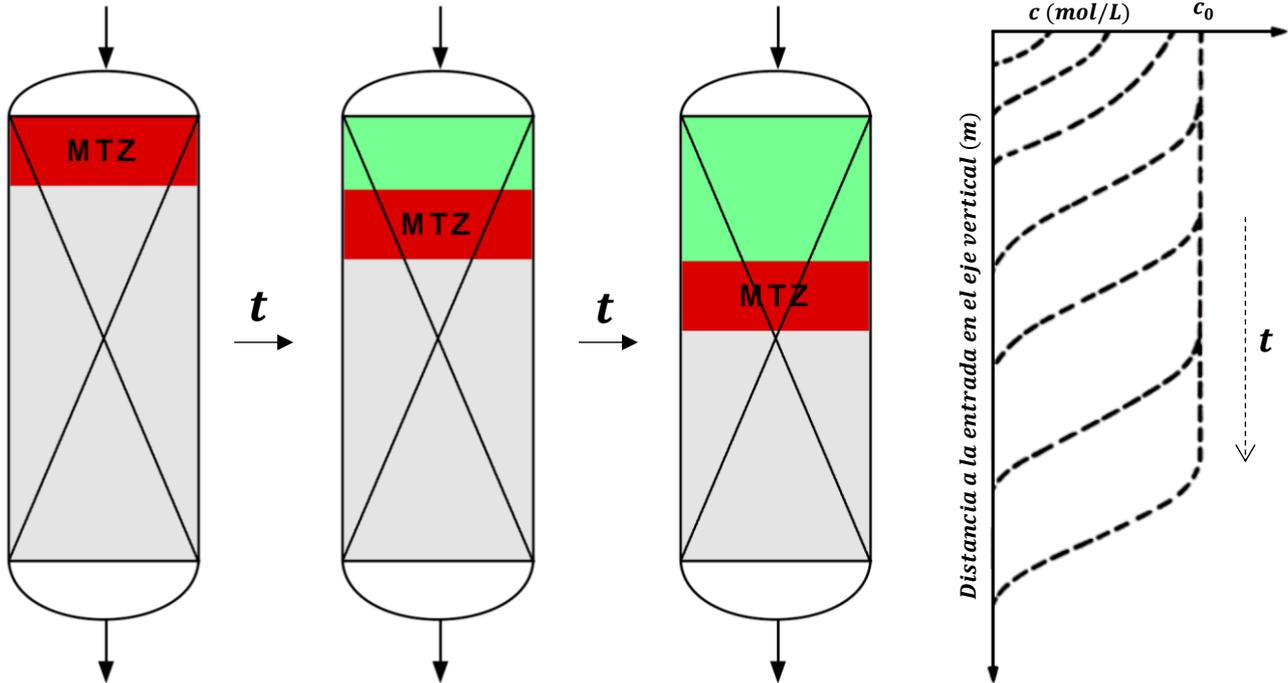


Figura 42: Dinámica del frente de adsorción en un lecho fijo.

Cuando el adsorbente está inicialmente limpio y recibe una alimentación con concentración constante, las capas superiores del lecho ubicadas cerca de la entrada adsorben el soluto aumentando la cantidad de este en la fase sólida (o adsorbida) hasta que se alcanza el equilibrio. Debido a que ya se ha alcanzado el equilibrio en esta zona superior, el adsorbente se encuentra saturado y pierde la capacidad de retención. Por esta razón, el frente de adsorción se desplaza a capas inferiores y progresivamente ocurre lo mismo en esas capas de forma que el frente de adsorción va desplazándose como una onda a lo largo de todo el lecho hasta alcanzar el extremo inferior de la columna. Este comportamiento queda reflejado en el gráfico de la Figura 42 en el que se representan los perfiles de concentración (concentración en fase fluida (c) frente a la altura del lecho desde el extremo superior) a medida que transcurre el tiempo de operación y, como se puede observar, no se trata de un frente plano y uniforme que viaje desde el principio de la columna hasta su salida, sino que el gradiente de concentración adquiere forma de curva sinusoidal y se distribuye a lo largo de la llamada zona de transferencia de materia (Mass Transfer Zone en inglés, de ahí las siglas MTZ).

Al trabajar con una disposición de este tipo en continuo, el tiempo para alcanzar la saturación en el lecho es un parámetro clave ya que es equivalente al tiempo de operación de la columna. Aunque la isoterma de adsorción es una herramienta de gran utilidad para el diseño de unidades en discontinuo, debido a que únicamente aporta información sobre la cantidad adsorbida en el equilibrio y no sobre el tiempo necesario para alcanzar dicho equilibrio, es necesario buscar otra vía para determinar los tiempos de contacto.

El procedimiento que se suele seguir para determinar los parámetros dinámicos en un sistema de estas características es la obtención experimental de la llamada “curva de ruptura”. Mediante este gráfico es posible determinar el volumen de fluido que es posible tratar con cierta cantidad de lecho antes de que este alcance el conocido como “punto de ruptura”, o, dicho de otra forma, el instante en que la concentración en el efluente de la columna es mayor que la concentración estipulada. Para poder entender el significado de esto es necesario diferenciar las secciones que conviven en un lecho de adsorción y comprender su actuación:

Como se puede distinguir en la Figura 43, a lo largo de un lecho de adsorción funcional cohabitan tres zonas en función del estado de saturación. Estas zonas consisten en:

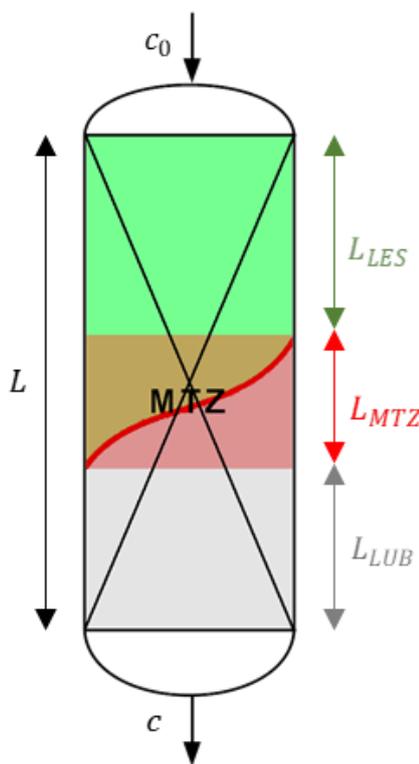


Figura 43: Esquema de zonas en una columna de adsorción.

1) Zona en equilibrio:

Es la zona saturada en la que la relación adsorbato-adsorbente ha alcanzado el máximo y no se admite más asimilación de soluto. Su longitud se define como L_{LES} (m) (Length of Equilibrium Section).

2) Zona de transferencia de materia:

A pesar de que, en el caso ideal, el frente de adsorción se considera plano y, por tanto, la zona de transferencia solo abarca una sección transversal unidimensional de la columna, en condiciones reales este frente no es plano y el avance de la adsorción no es homogéneo a lo largo de la columna, por lo que existe una longitud L_{MTZ} (m) a lo largo de la que ocurre la adsorción.

3) Zona no utilizada:

Esta parte ni está saturada, ni adsorbiendo componentes, es decir, todavía sigue “virgen” al fenómeno de adsorción. Su longitud se representa mediante L_{LUB} (m) (Length of the Unused Bed).

Si se mide la concentración de una sustancia adsorbible en el efluente del lecho en función del tiempo y se representan estos datos, se puede obtener un gráfico como el de la de la Figura 44 que describe la relación entre la concentración en la salida de la columna (c (mol/L)) y el tiempo de operación de esta (t (s)). Este gráfico se denomina curva de ruptura para esa sustancia concreta y, normalmente, tiene forma de S . La característica más relevante de una curva de ruptura es indicar cuando un lecho ha alcanzado la saturación.

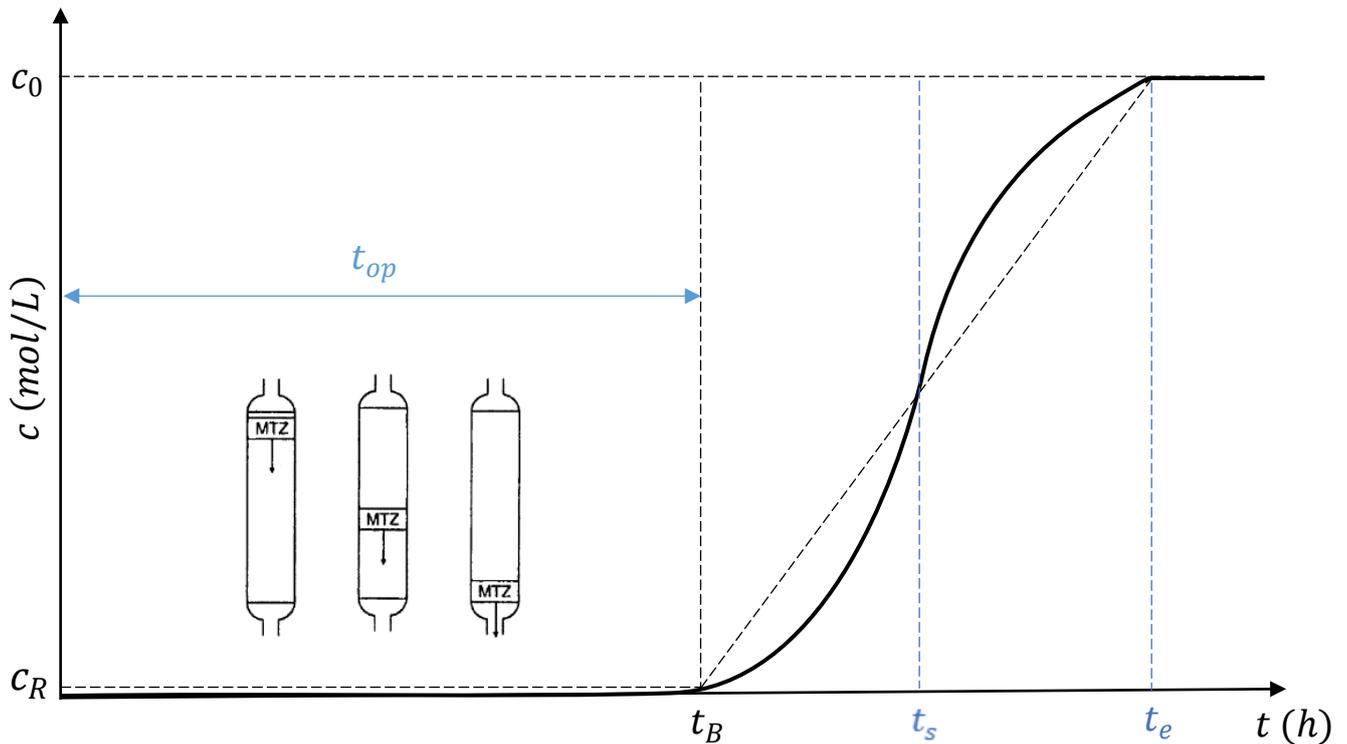


Figura 44: Ejemplo de curva de ruptura.

Como ya se ha señalado antes, a medida que progresa la adsorción, existe un frente de adsorción, comprendido dentro de una zona de transferencia de materia, que se traslada desde la parte superior del lecho hasta su salida inferior. Durante este tiempo la adsorción es exitosa, pero a partir del instante en que esa zona de transferencia de materia alcanza el fondo de la columna, el efluente empieza a contener poco a poco cantidades crecientes de la sustancia a adsorber. Este aumento en la concentración es debido a que el lecho restante disponible es insuficiente para contener la zona de transferencia de materia. La concentración va aumentando hasta llegar al punto en el que es mayor a cierta concentración estipulada (c_R (mol/L)) para dar por válido el tratamiento y es en ese momento en el que ocurre la “ruptura” del lecho. El instante en el que pasa este fenómeno es conocido como punto de ruptura y, como la longitud de lecho útil restante es insuficiente para llevar a cabo el proceso de forma correcta, el lecho debe ser reemplazado, ya sea por el mismo una vez regenerado, o utilizando adsorbente completamente nuevo.

Normalmente, se define el punto de ruptura (t_B) como el instante en que la concentración de salida es un 5 – 10% respecto a la concentración de entrada ($c/c_0 = 0,05 - 0,1$), aunque también puede relacionarse con una concentración en particular que no se desea sobrepasar (c_R (mol/L)). El punto estequiométrico (t_s) es el instante que el lecho se saturaría completamente si la adsorción fuera ideal (si la curva es simétrica coincide con $c/c_0 = 0,5$) y el instante t_e representa el punto a partir del que la concentración de salida es prácticamente igual a la de entrada ($c/c_0 = 0,9 - 0,95$).

En la Figura 45 se puede observar un perfil de concentración y un esquema de la columna para el instante en el que la zona de transferencia de materia alcanza el fondo del lecho adsorbente.

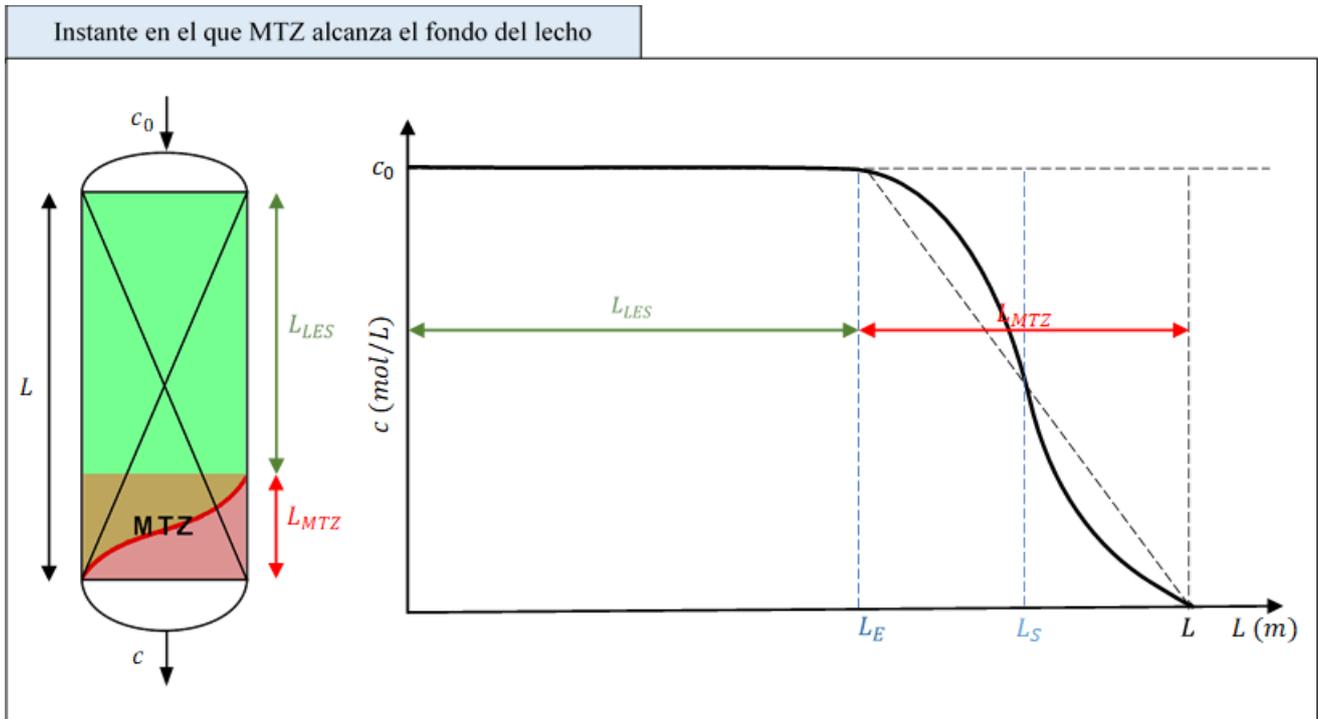


Figura 45: Ejemplo de perfil de concentración en el lecho de adsorción en el punto de ruptura.

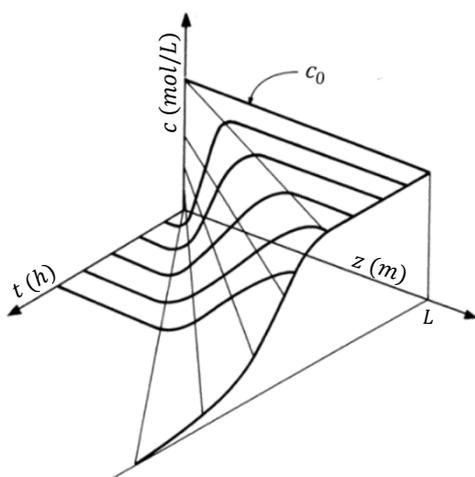


Figura 46: Representación de un volumen $c = f(z, t)$ característico de un adsorbato. (A. E. Rodrigues, 1989)

Se puede decir que la concentración de una especie dentro del lecho es una función tanto de su longitud como del tiempo, por lo tanto, una representación general es mediante un volumen $c = f(z, t)$ (véase la Figura 46). A raíz de la complicada interpretación y la difícil determinación de datos, esta representación en 3 dimensiones no es la más habitual. Los datos dinámicos de los lechos suelen representarse casi siempre mediante secciones al plano del tiempo o al plano de la longitud, siendo estos los perfiles de concentración para un tiempo determinado y la curva de ruptura, respectivamente. Cabe señalar que el corte de un plano normal al eje de concentración da una línea característica que representa, en coordenadas (z, t) la propagación de esa concentración particular por el lecho. La Figura 47 muestra las relaciones entre estas diversas representaciones.

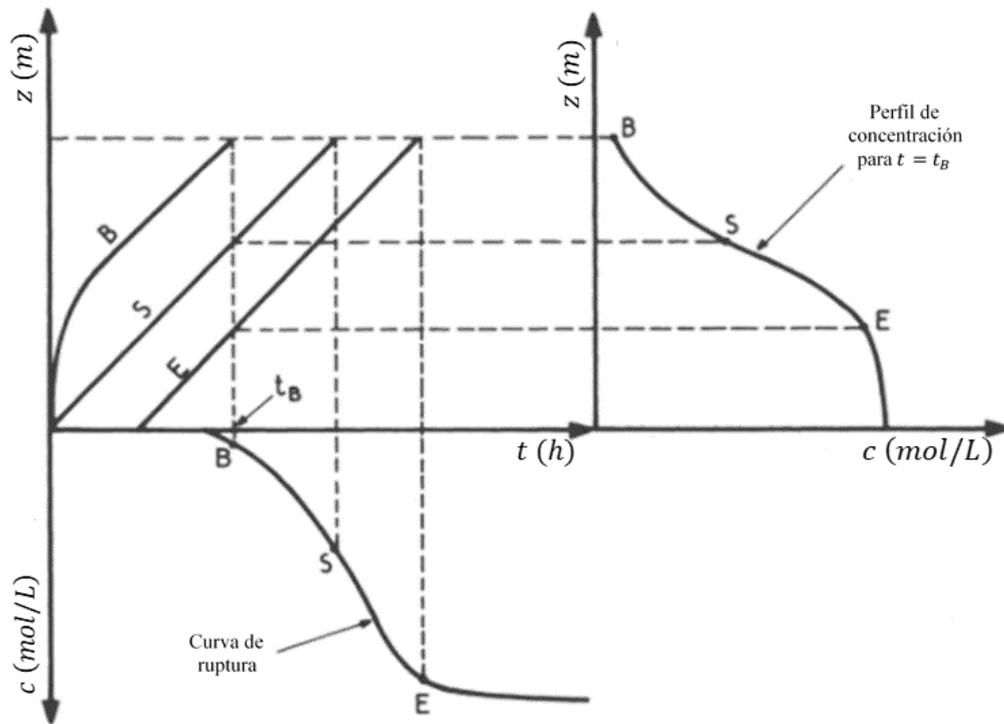


Figura 47: Relaciones entre las diversas representaciones dinámicas de un lecho de adsorción. (A.E. Rodrigues, 1989)

La curva de ruptura de un sistema de adsorción es función de varios parámetros. Por un lado, depende del tiempo de residencia del fluido. Como se hace evidente, a costa de comprometer el tiempo de contacto, un lecho puede utilizarse durante más tiempo al mantener caudales de alimentación altos. Esto no es considerado como una buena opción de diseño pues, aunque el lecho tarde en saturarse, la adsorción es de baja calidad. Por otro lado, la curva de ruptura también depende de las características de la corriente a tratar (composición, concentración de impurezas (c_0), temperatura, pH ...) y del adsorbente (características superficiales, tamaño de las partículas...), aunque depende de cada caso concreto.

El tiempo que transcurre desde el principio de la operación hasta alcanzar el punto de ruptura depende en última instancia de las resistencias implicadas en el fenómeno global, es decir, de la cinética de adsorción. En función de la naturaleza termodinámica y cinética, el comportamiento de los perfiles de concentración en el tiempo toma una forma constante o gradualmente se dispersa hasta cubrir todo el lecho.

Los tres comportamientos básicos se muestran en la Figura 48. Con una isoterma desfavorable, la amplitud de la zona de transferencia de materia se vuelve equivalente a la longitud total del lecho, para una isoterma lineal la amplitud se vuelve proporcional a la raíz cuadrada de la longitud de lecho y, para una isoterma favorable, se aproxima a un ancho constante. A este último se le llama comportamiento de patrón constante.

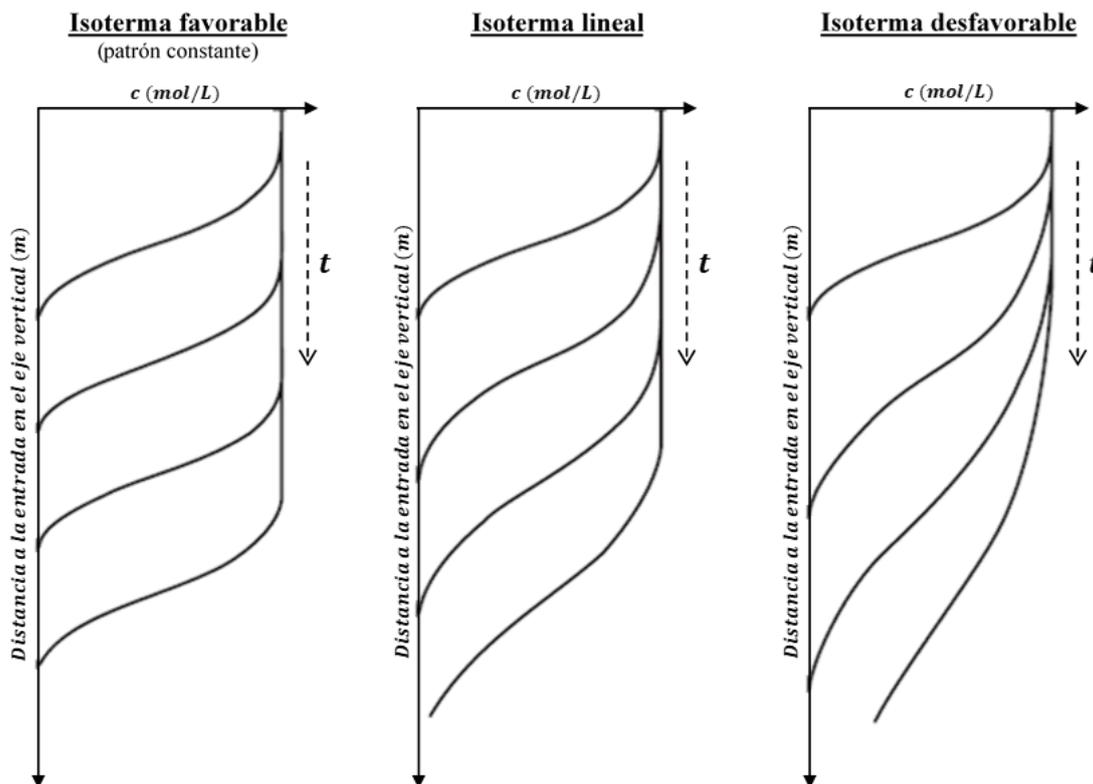


Figura 48: Comportamientos límite de un lecho fijo: patrón constante para la isoterma favorable (izquierda), propagación de raíz cuadrada para la isoterma lineal (centro) y onda simple para la isoterma desfavorable (derecha).

Se ha de tener en cuenta que para el caso límite de una isoterma desfavorable, en poco tiempo de operación, la zona de transferencia de materia requerida para el proceso de adsorción iguala la totalidad del lecho volviendo la columna inútil rápidamente por su pronta ruptura (Figura 49). Cabe destacar que en el caso de la propagación de raíz cuadrada también existe ese riesgo puesto que la zona de transferencia de materia cada vez se va ensanchando más. Por esta razón, la mejor forma de trabajar con una columna es cuando existe un comportamiento de patrón constante. Para conseguir este modo de trabajo es crucial encontrar una buena interacción adsorbente-adsorbato en los ensayos previos.

Otro dato de interés de esta disposición es que, cuando se alcanza el punto de ruptura, en la parte inferior todavía puede quedar adsorbente virgen. Obviamente, cuanto más amplia sea la zona de transferencia de masa (siendo el caso límite la Figura 49), mayor será la extensión de adsorbente que no se llega a utilizar. Debido a que para reemplazar el lecho es necesario extraerlo todo sin distinción, se buscan adsorciones con isothermas muy favorables que disminuyan la anchura de la MTZ. También, para facilitar un comportamiento más uniforme en la adsorción, la distribución de tamaños de grano en el lecho suele ser muy estrecha y, generalmente, un menor tamaño se correlaciona con un mayor rendimiento en la adsorción al permitirse un mejor empaquetamiento y más cantidad de adsorbente en un mismo lecho. En los procesos a gran escala normalmente se usan granos de entre 0,06 y 6 mm.

El lecho de adsorbente generalmente recibe el sobrenombre de “filtro” y suele instalarse en un tanque cilíndrico vertical con fondo cónico o forma de plato. El diámetro de este recipiente puede llegar a 4.5 m y a una altura de hasta de 10 m. El adsorbente se coloca sobre una pantalla que, a su vez se coloca en un plato perforado. En el caso de arcillas decolorantes, el lecho puede contener hasta 50000 kg de adsorbente.

Además del recipiente cilíndrico vertical a presión o abierto que suele ser la columna o “adsorbedor”, estos sistemas operan junto con tuberías asociadas, válvulas, controles, medios de apoyo para el adsorbente, medios para asegurar que el fluido se distribuya uniformemente y ciertos equipos auxiliares necesarios para lograr la regeneración del adsorbente. Mientras que el equipo de tratamiento de gas incluye sopladores o compresores con múltiples vías para evitar que se produzcan puntos muertos, el equipo de tratamiento de líquidos incluye bombas con recipientes de sobrecarga según sea necesario para asegurar el flujo continuo.

En los sistemas líquidos, suele haber un único acceso al interior de la columna y ramificarse en varias tuberías perforadas a lo largo de su longitud. Estos agujeros no suelen estar espaciados ni dimensionados uniformemente, sino distribuidos de tal forma que permitan proporcionar un flujo igual a toda la superficie del lecho.

Normalmente, el flujo del líquido es descendente, ya sea bajo la fuerza de la gravedad o a presión. Al principio de la operación es normal dejar que el lecho se empape de la alimentación durante cierto tiempo para desplazar el aire entre y dentro de las partículas de adsorbente. En el caso de que el producto deseado sea el adsorbato, cuando la curva de ruptura es inicialmente plana, cosa bastante común, y la concentración del efluente durante el inicio de la operación es mucho menor a las especificaciones requeridas, a menudo se permite la acumulación del efluente en un tanque inferior para así mezclar el volumen acumulado hasta alcanzar la concentración exigida.

Cuando se tiene que practicar la regeneración o el cambio de lecho, se detiene el flujo de fluido y se drena el líquido en el filtro. Ahí mismo puede lavarse el sólido con un disolvente adecuado (agua en los filtros para refinación de azúcar o nafta en el caso de productos del petróleo, por ejemplo) y, si es necesario, eliminar este disolvente mediante vapor. A continuación, el sólido puede ser extraído del filtro y reactivado por combustión o mediante otro procedimiento en función de la naturaleza de la adsorción.

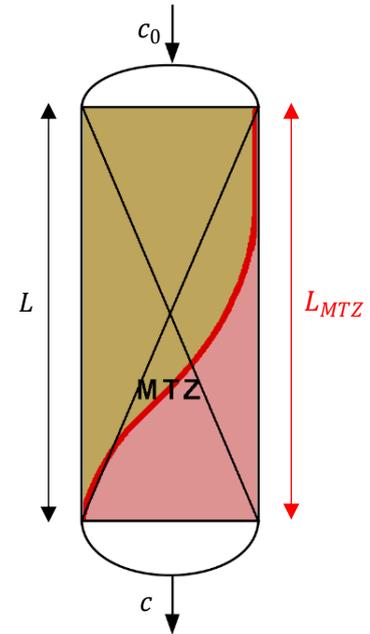


Figura 49: Caso límite de un lecho de adsorción.

Aunque la pérdida de presión permisible de un líquido al pasar por un lecho no es un factor restrictivo, se puede modificar cambiando la relación entre diámetro y profundidad y/o cambiando el tamaño de los granos. A veces, el coste total de la etapa de adsorción puede reducirse diseñando para caídas de presión generales de 300 a 600 *kPa* ya que el bombeo no supone el coste principal. Las columnas de carbón activo utilizadas en el tratamiento de aguas residuales se diseñan y construyen utilizando las mismas consideraciones que las utilizadas para la eliminación de la turbiedad mediante filtros de arena o multicapa.

Un lecho de carbono típico se muestra en la Figura 50. Tales dispositivos funcionan a presión ambiente a menudo y no son más que depósitos abiertos o balsas de hormigón con distribución de flujo mediante un simple rebosadero. En algunos casos, las columnas incorporan un medio para el drenaje de líquidos antes del calentamiento (utilizando gas para ayudar a desplazarlo), cuando se utiliza, ocasionalmente o en cada ciclo, la regeneración in situ.

Para evitar el escape del adsorbente por el fondo de la columna se utilizan dos tipos de sistemas de soporte: el primero consiste en una serie de capas de rejillas y mallas donde cada capa sucesiva tiene aperturas más pequeñas, siendo la última lo suficientemente estrecha para evitar que las partículas pasen; el segundo tipo de soporte es un sistema graduado de partículas como bolas de cerámica o grava que descansan directamente en la parte inferior del adsorbente. Un sistema típico podría consistir en 100 *mm* de material de 50 *mm* de diámetro, cubierto por capas sucesivas de 25, 12 y 6 *mm* de material de soporte para un adsorbente de 3 *mm*. En tratamientos del agua residual es común que el soporte empiece con bloques de filtro y tener una capa superior de arena. En la Figura 50 se puede ver un ejemplo de columna de adsorción de sección rectangular con una distribución de fluido homogénea mediante un sistema de rebosaderos y un lecho de carbón activo que cuenta con un soporte graduado de partículas.

Cabe tener en cuenta que, en una columna de flujo descendente sin prefiltración, los sólidos suspendidos en el agua residual pueden con el tiempo acumularse en la parte superior del lecho bloqueando la circulación oponiéndose al paso del fluido. Para evitar estos tapones y aliviar la caída de presión puede ser necesario realizar contralavados periódicos.

Aunque lo más habitual es que el fluido descienda, existen columnas en las que la entrada se encuentra situada en la parte inferior de forma que va llenándose desde abajo hacia arriba. En esta operación, si se quiere evitar el levantamiento del lecho es importante que la fuerza de flotación del líquido sumada a la caída de presión no exceda las fuerzas gravitacionales, pero debido a que hay muy poco aumento en la caída de presión, más allá de la velocidad de elevación (o de fluidización), algunos sistemas de líquidos están diseñados con expansión del lecho para limitar la caída de presión. También se prefieren los lechos expandidos de absorción ascendente cuando el líquido contiene algún sólido en suspensión para que el lecho no actúe como filtro y se obstruya. Dado que una mayor expansión hace que el adsorbente se mueva demasiado, disminuye la eficacia

de la eliminación, por esta razón, la expansión suele limitarse a un 10%. En estos casos particulares es necesaria la acción de bombas para conseguir una buena circulación, pero sin excederse pues las velocidades más altas también tienden a causar demasiada turbulencia de partículas, abrasión, desgaste y erosión. Para usos industriales la configuración de flujo ascendente no suele ser la más recomendada, sobre todo, en el caso de que el fluido sea líquido.

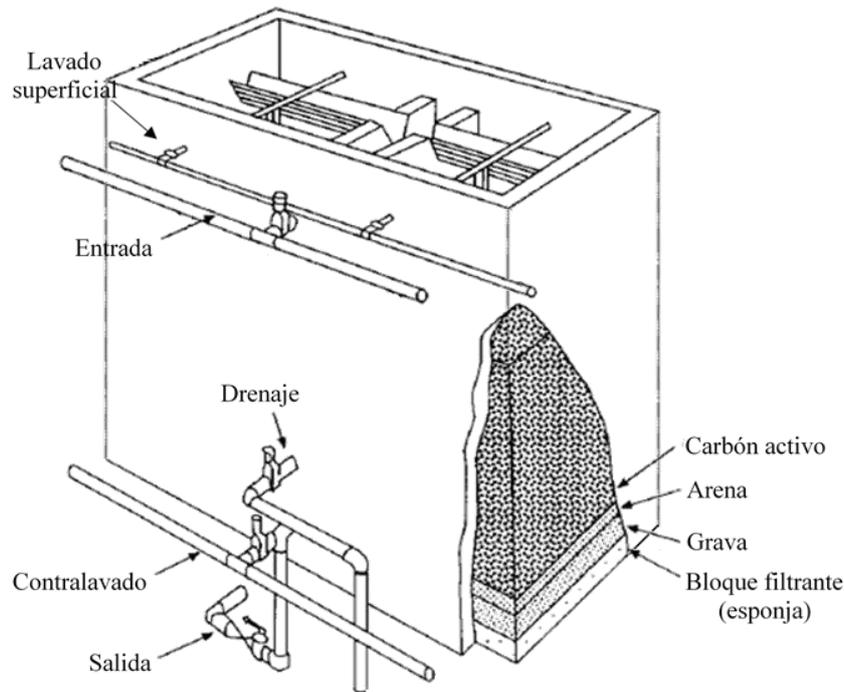


Figura 50: Columna de adsorción de lecho fijo de sección rectangular con sistema de soporte y distribución.
(Don W. Green, Robert H. Perry, 2007)

A continuación, en la Figura 51 se presentan las partes de una columna presurizada de adsorción habitual. Esta columna se dispone en una sección cilíndrica con un lecho de carbón activo con soporte de malla metálica y distribución de flujo mediante una ramificación perforada.

El tipo de configuración más recomendable para el proceso de separación por adsorción depende en gran parte de la forma que toma la curva de ruptura. En algunos casos se utiliza una única columna, pero en otros, múltiples columnas en serie, en paralelo u otras configuraciones. A modo de ejemplo, en la Figura 52 se puede observar un sistema de columnas en serie en el que el efluente de cada columna constituye la alimentación de la siguiente. Cuando la primera columna de la serie (A) alcanza la saturación se separa del sistema para la regeneración de su lecho y se coloca una columna con adsorbente virgen al final de la serie, pasando a ser ahora la segunda columna (B) la primera de la serie. Realizando este cambio cada vez que se satura la primera columna del sistema se consigue una operación totalmente continua sin paros por tener que regenerar el adsorbente.

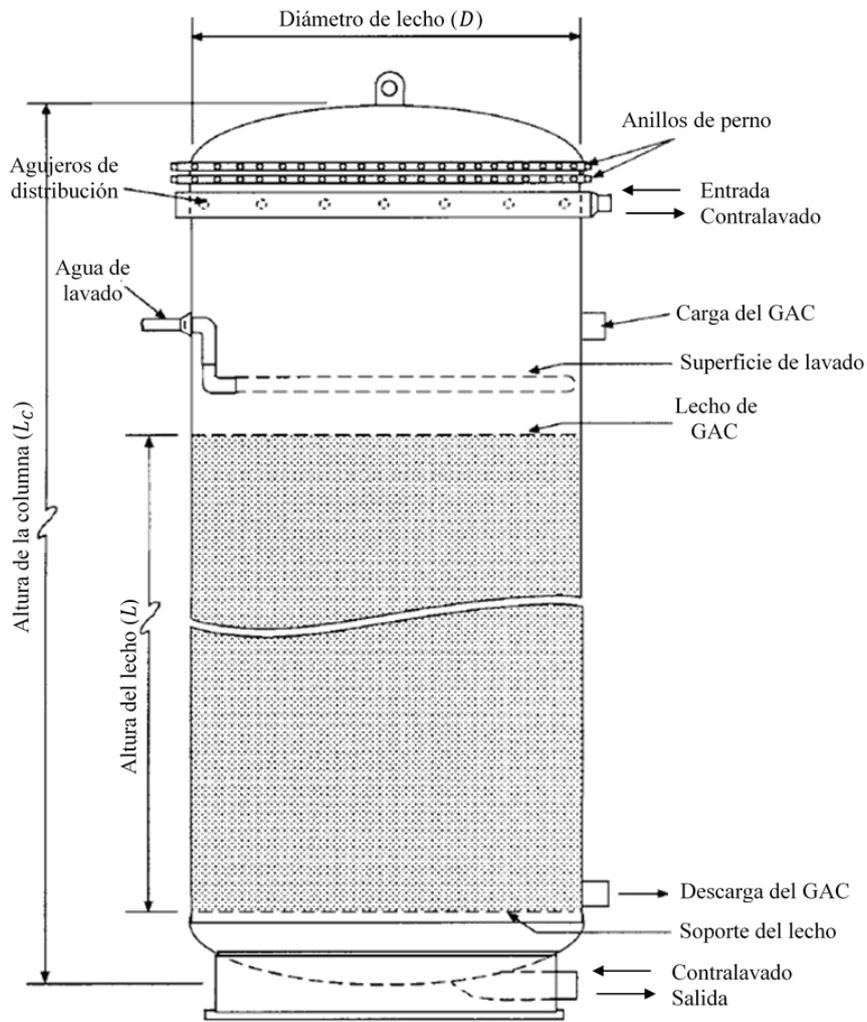


Figura 51: Columna de adsorción presurizada de sección cilíndrica con un lecho de carbón activo. (Don W. Green, Robert H. Perry, 2007)

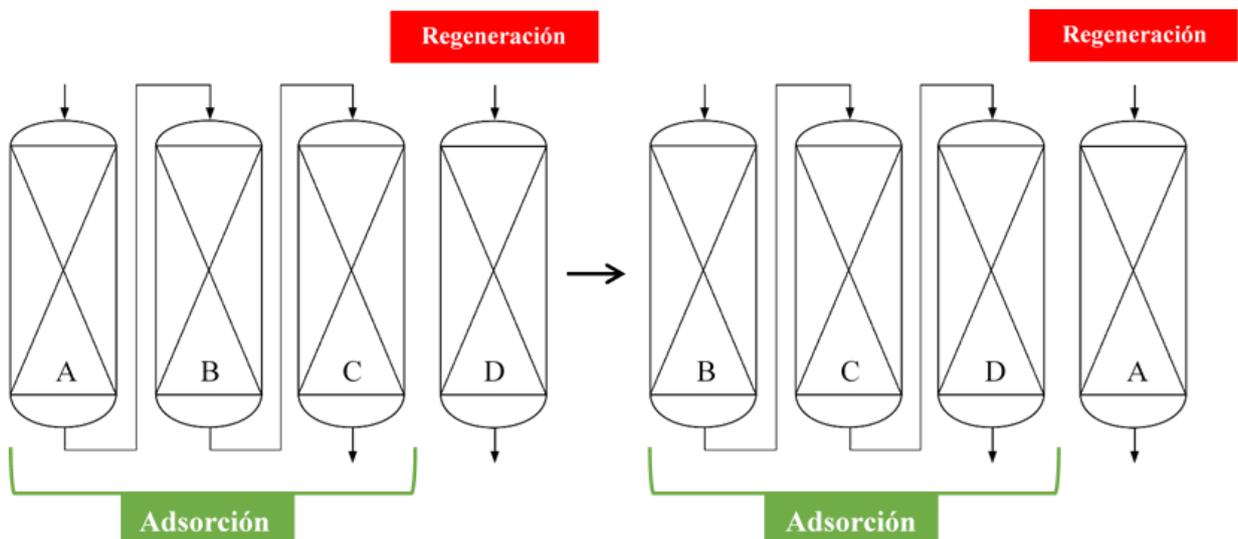


Figura 52: Ejemplo de configuración de lechos fijos en serie.

Otro sistema también utilizado para llevar a cabo el proceso de adsorción es el de lecho móvil pulsante. En esta configuración el fluido a tratar circula hacia la parte superior de la columna y el lecho de adsorbente se desplaza en contracorriente al flujo del fluido de forma que el adsorbente ya saturado se extrae para su regeneración por el fondo de la columna y al mismo tiempo una cantidad igual se introduce desde la parte superior. Esto equivale a separar la columna inicial en un sistema de columnas en serie. Los lechos pulsantes pueden operar de forma continua o discontinua. Cuando la operación es en continuo, constantemente se está retirando adsorbente desde el fondo de la columna, mientras que, en un régimen de operación discontinuo, se retira adsorbente de la columna cada cierto intervalo de tiempo. Debido al alto coste de transportar continuamente partículas sólidas suele ser más económico pasar el fluido a través de un lecho estacionario de adsorbente, aunque se sacrifique la condición de trabajo estacionario.

- **Sistemas de regeneración:**

Mientras que en algunos casos la regeneración se puede llevar a cabo en el interior de las mismas columnas con un equipo adicional conectado, para la mayoría de los tratamientos de aguas residuales con carbón térmicamente reactivado, construir un dispositivo regenerador independiente de las columnas de adsorción es mucho más rentable que obrar todas las columnas de la planta con un material capaz de soportar las severas condiciones para poder regenerar el adsorbente sin su extracción. En otros casos, cuando es factible tratar el alimento durante semanas o meses en lugar de sólo horas o días, está económicamente justificada la regeneración del adsorbente agotado mediante la contratación de una empresa externa en lugar de instalar un equipo de regeneración in situ.

Para el caso de los carbones activos, aunque las condiciones exactas que se utilizan para su reactivación térmica dependen del tipo de carbón y de los adsorbatos que se vayan a eliminar, el proceso puede requerir las mismas altas temperaturas y condiciones utilizadas en su fabricación. La regeneración de los carbones saturados, generalmente, consiste en cuatro etapas: secado, desorción, pirólisis y carbonización, y quemado. Cada una

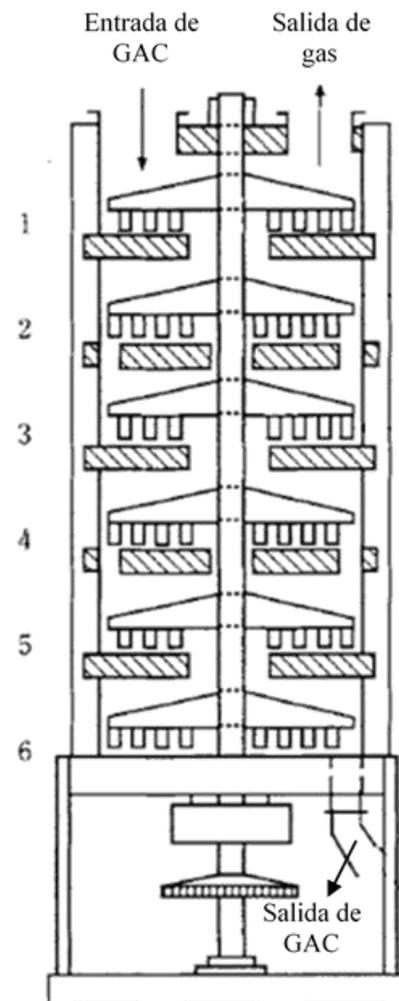


Figura 53: Horno de 6 pisos para la reactivación de carbón activo.

(Don W. Green, Robert H. Perry, 2007)

de estas etapas está asociada a cierta gama de temperaturas y se llevan a cabo en hornos de múltiples pisos como el que se muestra en la Figura 53.

Este sistema de seis pisos presentado en la figura es una configuración típica utilizada para regenerar carbones procedentes de operaciones de depuración del agua. En estos equipos el carbón activo saturado y húmedo se introduce por la parte superior y por medio de unos brazos giratorios es rastrillado de un piso a otro. En su transcurso por los dos primeros pisos es secado, a continuación, en el piso inferior ocurre la pirólisis (desorción y descomposición) y, finalmente, en los cuatro pisos finales tiene lugar la reactivación. La temperatura puede variar desde 100 °C en la parte superior hasta 950 °C en la inferior. En cada piso se añaden cantidades variables de aire, vapor y/o combustible con tal de mantener las condiciones establecidas para la reactivación y, además del horno de pisos múltiples, el sistema de reactivación también se compone de equipo adicional para transportar, almacenar, deshidratar y enfriar el carbón activo regenerado.

- **Sistemas de contacto alternativos:**

A pesar de que los equipos más comunes son los lechos fijos que funcionan con interrupción periódica para su regeneración, también existen otros sistemas alternativos para la purificación o depuración de líquidos. Cuando se trata de procesos de separación más complejos, frecuentemente se utilizan dispositivos más sofisticados como, por ejemplo, en los procesos de separación de p-xileno y el p-cresol o de separación de n-parafinas de naftas kerosenos y gasoil.

5.5.6.1. Consideraciones de la mecánica de fluidos en los lechos fijos

A continuación, se llevan a cabo algunas aclaraciones y descripciones relevantes respecto a la forma de cuantizar el comportamiento de un fluido dentro de un lecho poroso:

- **Módulo o número de Reynolds para lechos porosos (Re_m):**

El módulo adimensional denominado como módulo o número de Reynolds (Re) representa el cociente entre las fuerzas de inercia y las fuerzas viscosas de un fluido circulante y permite identificar y delimitar los diferentes regímenes posibles de circulación. Para el caso de circulación de fluidos por el interior de conducciones, toma la forma de la ecuación (1).

$$Re = \frac{\rho_f \cdot v \cdot D}{\mu} \quad (1)$$

Suponiendo el caso de un fluido homogéneo (una única fase) y newtoniano que llena completamente la conducción y circula en régimen estacionario por una conducción de sección

circular constante, son posibles dos mecanismos de circulación de fluidos: laminar y turbulento (véase la Figura 54). Para valores de Re menores de 2100 el flujo de circulación es completamente laminar. A partir de 2100 comienza a desarrollarse un núcleo turbulento en el centro de la conducción que se pueden alargar hasta valores próximos a 4000, este intervalo se denomina zona crítica. Para valores dentro del intervalo de 4000 y 10000, el régimen de circulación es de “transición” y, en último lugar, para valores mayores a 10000 el flujo es claramente turbulento.



Figura 54: Regímenes límite de circulación de fluidos.

Pero, en el caso de lechos porosos esta forma de definir el módulo de Reynolds queda obsoleta y pasa a usarse el módulo o número de Reynolds para lechos porosos (Re_m).

$$Re_m = \frac{\rho_f \cdot v \cdot D_p}{\mu \cdot (1 - \varepsilon)} \quad (2)$$

En este caso, los límites de los regímenes toman los siguientes valores:

Para valores de Re_m menores a 10 la circulación es laminar, mientras que dentro del intervalo de 10 a 1000, el régimen de conducción es de transición y, finalmente, para valores mayores o iguales a 1000, el régimen es completamente turbulento.

- **Densidades y porosidades:**

En el caso de los adsorbentes se pueden utilizar varias definiciones de densidad y porosidad. Para empezar, se define la densidad aparente (ρ_{apb}) de un grano de adsorbente teniendo en cuenta el volumen ocupado por la fase sólida y el volumen de sus oquedades internas. Se puede obtener mediante la siguiente relación entre su porosidad interna (ε) y su densidad “esquelética” (ρ_b):

$$\rho_{apb} = \rho_b \cdot (1 - \varepsilon)$$

Otra definición de densidad posible es la densidad de lecho (ρ_{Lecho}). Este parámetro implica el volumen ocupado por las oquedades externas a los granos de adsorbente, es decir, los huecos formados entre los granos al colocarse en el lecho, sumado al volumen ocupado por los granos de adsorbente en sí. Se define mediante la siguiente expresión relacionada con la densidad aparente del adsorbente (ρ_{apb}) y la porosidad externa (ε_{Lecho}):

$$\rho_{Lecho} = \rho_{apb} \cdot (1 - \varepsilon_{Lecho})$$

Por lo tanto, se puede definir una porosidad total en un lecho (ε_T) teniendo en cuenta las dos porosidades descritas, la porosidad interna (ε) y la porosidad externa (ε_{Lecho}) al adsorbente:

$$\varepsilon_T = \varepsilon_{Lecho} + (1 - \varepsilon_{Lecho}) \cdot \varepsilon$$

En un lecho poroso es importante que haya suficiente espacio como para que se permita el avance del fluido sin una pérdida de energía desproporcionada debido al rozamiento, pero también se debe atender al buen empaquetamiento para conseguir el mayor contacto adsorbente-adsorbato posible. Es decir, debe de existir un compromiso entre la cantidad de espacio libre en el interior del lecho y el grado de empaquetamiento para conseguir tiempos de residencia suficientemente altos como para que se produzca una adsorción. La cantidad de espacio libre en un lecho de estas características depende de algunas propiedades como la porosidad total del lecho (ε_T), el diámetro de las partículas o granos (D_p), su esfericidad (Φ) o forma, su orientación o disposición o su rugosidad.

Por último, también se puede definir la densidad húmeda para una partícula de adsorbente (ρ_w), siendo ρ_f la densidad del fluido, como:

$$\rho_w = \rho_b + \varepsilon \cdot \rho_f$$

- **Velocidad del fluido y tiempo de residencia:**

Es importante aclarar que la velocidad lineal real de avance del fluido a través de los huecos del lecho poroso no es igual a la velocidad superficial de avance del fluido. El cálculo de ambas variables es en realidad de la siguiente forma:

$$v = v_{Superficial} = \frac{Q_v}{A_{Lecho\ vacío}} = \frac{Q_v}{A} \quad y \quad v' = v_{Real} = \frac{Q_v}{A_{Lecho\ empacado}} = \frac{Q_v}{A'}$$

Obviamente el área de lecho empacado (A') no se presenta constante a lo largo de la sección del lecho empacado ya que existe un gradiente de velocidad, encontrándose la máxima velocidad en el centro de los huecos y una velocidad nula en las capas de líquido alojadas inmediatamente contiguas a la interfase del adsorbente sólido, por esta razón es conveniente trabajar con valores medios. Aunque no se especifique en las fórmulas, se asume que se tratan velocidades medias y no puntuales. Se puede decir que la velocidad real (v') de circulación del fluido a través del lecho poroso es mayor a la velocidad superficial (v) para un mismo caudal, puesto que el área de lecho vacío (A) siempre va a ser menor al área de lecho empacado (A').

La velocidad real (v') también se puede calcular con relación a la superficial de la siguiente forma:

$$v' = \frac{v}{\varepsilon_{Lecho}}$$

Por otro lado, el área de lecho empacado (A') se puede relacionar con el área de la sección del recipiente de la siguiente forma (A):

$$A' = A \cdot \varepsilon_{Lecho}$$

Una vez aclarados estos conceptos, cabe señalar que se suele usar el *EBCT* (tiempo de contacto de lecho vacío) para cuantizar el tiempo que el fluido está en el interior de la columna, aunque según lo que se ha explicado, no coincide exactamente con el tiempo de residencia real.

$$EBCT = \tau = \frac{V_{Lecho}}{Q_v} = \frac{A \cdot L}{Q_v} \quad (3)$$

• **Balance de materia y volumen tratado:**

Balance de materia al componente adsorbible (a):

Salida – Entrada + Acumulación = Generación

$$\dot{m}_a - \dot{m}_{a_0} + \frac{dm_a}{dt} = 0$$

$$c_a \cdot Q_v - c_{a_0} \cdot Q_{v_0} + \frac{dm_a}{dt} = 0$$

$$\frac{dm_a}{dt} = c_{a_0} \cdot Q_{v_0} - c_a \cdot Q_v$$

Se puede asumir que el caudal de salida y el de entrada son iguales al ser procesos que suelen ocurrir a baja velocidad:

$$\frac{dm_a}{dt} = Q_{v_0} \cdot (c_{a_0} - c_a)$$

$$\frac{dm_a}{dt} = Q_{v_0} \cdot (c_{a_0} - c_a) \cdot \frac{c_{a_0}}{c_{a_0}}$$

Se supone:

Avance en una sola dirección (sin dispersión axial), un único componente adsorbible, operación isoterma, adsorción instantánea, lecho fijo e inicialmente libre de adsorbente...

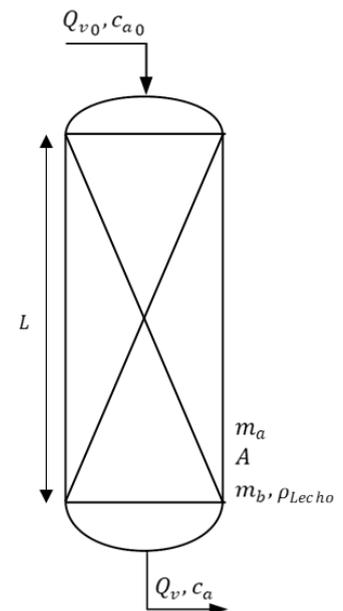


Figura 55: Variables en una columna de adsorción.

$$\frac{dm_a}{dt} = Q_{v0} \cdot c_{a0} \cdot \left(1 - \frac{c_a}{c_{a0}}\right)$$

$$\int_{m_{a0}=0}^{m_a} dm_a = \int_{t_0}^t Q_{v0} \cdot c_{a0} \cdot \left(1 - \frac{c_a}{c_{a0}}\right) \cdot dt$$

$$m_a = Q_{v0} \cdot c_{a0} \cdot \int_{t_0}^t \left(1 - \frac{c_a}{c_{a0}}\right) \cdot dt \quad (4)$$

El volumen total de agua tratado se puede calcular de forma teórica como:

$$V_{Tratado} = \frac{(m_b \cdot q_a)}{c_{a0}} \quad (5)$$

El parámetro q_a se establece según los datos bibliográficos o experimentales, pero se ha de tener en cuenta que es muy probable que no alcance el valor de adsorción teórica en equilibrio debido al insuficiente tiempo de contacto y que la adsorción dinámica sea un 25 – 75% de ese valor teórico.

$$q_a = [0,25 - 0,75] \cdot q_{a_{eq}} \quad (6)$$

- **Modelo matemático (balance de energía mecánica):**

Aplicando el balance de energía total por unidad de masa en un tramo infinitesimal de la conducción por el que circula el fluido en régimen estacionario ($\Delta\dot{m} = 0$):

$$dh + de_p + de_k = dq + dw$$

Donde, la energía cinética se describe de la siguiente forma:

$$de_k = d\left(\frac{v^2}{2 \cdot \alpha}\right)$$

Siendo α es un factor que es función del régimen de turbulencia. Para régimen laminar, $\alpha = 0,5$, mientras que para régimen de transición va aumentando hasta ser muy próximo a 1 en régimen turbulento.

Volviendo al balance de energía, añadida la definición de energía cinética descrita:

$$dh + de_p + d\left(\frac{v^2}{2 \cdot \alpha}\right) = dq + dw$$

Aplicando la definición de entalpía,

$$h = u + p \cdot v = u + \frac{p}{\rho}$$

Se sustituye dh por su definición termodinámica:

$$d\left(u + \frac{p}{\rho}\right) + de_p + d\left(\frac{v^2}{2 \cdot \alpha}\right) = dq + dw$$

$$du + \frac{dp}{\rho} + \frac{p}{d\rho} + de_p + d\left(\frac{v^2}{2 \cdot \alpha}\right) = dq + dw$$

Por otro lado, aplicando el primer principio de la termodinámica, se obtiene la siguiente ecuación:

$$dq = du + p \cdot dv = du + \frac{p}{d\rho}$$

Sin embargo, como en los sistemas en que existe rozamiento, el efecto de la fricción genera calor en el sistema a base de convertir parte de la energía mecánica en energía térmica, es decir, se produce una pérdida de energía mecánica, se puede añadir un término que lo exprese. La ecuación se escribe de la siguiente forma:

$$dq + dF = du + \frac{p}{d\rho}$$

Despejando el término de pérdida de energía,

$$dF = du + \frac{p}{d\rho} - dq$$

Y sustituyéndolo en el balance de energía:

$$\frac{dp}{\rho} + de_p + d\left(\frac{v^2}{2 \cdot \alpha}\right) = dw - dF$$

Si se integra la anterior ecuación en los puntos seleccionados de entrada y de salida, suponiendo densidad del fluido independiente de la presión del sistema, se obtiene el balance de energía mecánica por unidad de masa en el mismo fragmento de tubería por la que circula el fluido en régimen estacionario (con una única sección de entrada y otra de salida).

$$g \cdot (z_s - z_e) + \left(\frac{v_s^2}{2 \cdot \alpha_s} - \frac{v_e^2}{2 \cdot \alpha_e} \right) + \frac{(p_s - p_e)}{\rho} + \Delta F = w \quad (7)$$

En el balance de energía mecánica, ΔF es la pérdida de energía mecánica por unidad de masa, debido a los procesos de fricción, y representa la parte de la energía mecánica del sistema que se convierte en calor que se transmite o en energía interna debido al rozamiento. Se trata de un término paraguas que recoge las diversas pérdidas de energía a las que se somete el sistema. Pudiendo ya calcular la pérdida de energía mecánica que experimenta un fluido al circular por una conducción, se puede deducir fácilmente la energía que se requiere para su transporte, es decir, se puede llegar a la elección de la bomba más adecuada.

Esta energía por unidad de masa es precisamente el valor w del balance de energía mecánica. Sin embargo, cuando se discuten problemas de bombeo de líquidos, todas las ecuaciones se suelen expresar en función de las cargas, que no son más que los mismos términos del balance de energía mecánica pero divididos por g , de forma que las unidades de cada término son ahora $m = \left(\frac{J \cdot s}{kg \cdot m} \right)$, es decir, el valor de la energía de cada término se expresa como la altura a la que podría elevarse 1 kg de fluido que se desea transportar.

Así pues, el balance de energía mecánica quedará, expresando todos los términos como cargas, de la siguiente forma:

$$h_s = (z_s - z_e) + \left(\frac{v_s^2}{g \cdot 2 \cdot \alpha_s} - \frac{v_e^2}{g \cdot 2 \cdot \alpha_e} \right) + \frac{(p_s - p_e)}{g \cdot \rho} + \frac{\Delta F}{g} = \frac{w}{g} = h_B \quad (8)$$

Siendo h_B la carga que debe proporcionar la bomba y h_s la carga requerida por el sistema.

Las contribuciones de pérdida de energía mecánica a tener en cuenta en el sistema propuesto consisten en las siguientes:

$$\Delta F = \Delta F_r + \Delta F_a + \Delta F_l \quad (9)$$

Siendo ΔF_r la pérdida de energía mecánica en todos los tramos rectos debido al rozamiento y turbulencia, ΔF_a la pérdida de energía mecánica en todos los accidentes del sistema (“pérdidas

menores”) y ΔF_l la pérdida de energía mecánica provocada por el paso del fluido a través de un lecho sólido poroso.

A continuación, se concreta como obtener cada una de estas aportaciones:

- **Perdida de energía en los tramos rectos (ΔF_r):**

Se puede obtener a partir de la ecuación de Fanning determinando el valor de f previamente mediante el diagrama de Moody.

$$\Delta F_r = 2 \cdot f \cdot v^2 \cdot \frac{L_{eq}}{D_{Tubería}} \quad (10)$$

- En el caso de régimen laminar, se sabe que $f = 16/Re$, por lo que la ecuación de Fanning se puede escribir de la siguiente forma:

$$\Delta F_r = \frac{32 \cdot \mu \cdot v \cdot L}{\rho \cdot D_{Tubería}^2} \quad (11)$$

- Si, por el contrario, el régimen es turbulento, se debe obtener f a través del gráfico de Moody ($4 \cdot f \propto (Re, \varepsilon/D)$), calculando primero la rugosidad relativa del material de la conducción (ε/D).

- **Perdida de energía en los accidentes (ΔF_a):**

Se puede calcular mediante dos métodos diferentes. Mediante ábacos de doble entrada calculando una longitud equivalente para cada uno de los accidentes ($L_{eq} \propto$ tipo de accidente, diámetro de conducción). Una vez obtenida la longitud, solo con añadirla a la ecuación de Fanning, ya se tendrá en cuenta el accidente.

Otra vía para determinar la pérdida de energía causada por los accidentes es usar el procedimiento de las cargas de la velocidad. El procedimiento consiste en calcular la pérdida de energía aplicando la siguiente ecuación:

$$\Delta F_a = K \cdot \frac{v^2}{2} \quad (12)$$

Donde K es la suma de todas las constantes características de cada accidente. Estas constantes se encuentran tabuladas en bibliografía (como, por ejemplo, en el libro de Perry y Chilton “Chemical Engineers Handbook”):

$$K = \sum_{i=1}^N k_i \quad (13)$$

- **Perdida de energía en el lecho poroso (ΔF_L):**

En cuanto a la pérdida de carga provocada por el lecho, se puede obtener mediante la ecuación de Ergun. Esta ecuación abarca un amplio intervalo de valores de Reynolds y es la combinación lineal de las ecuaciones de Kozeny y la de Carman.

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{150 \cdot \mu \cdot (1 - \varepsilon_T)^2}{D_p^2 \cdot \varepsilon_T^3} \cdot v + \frac{1,75 \cdot \rho_f \cdot (1 - \varepsilon_T)}{D_p \cdot \varepsilon_T^3} \cdot v^2 \quad (14)$$

A caudales de circulación bajos que impliquen un régimen de circulación laminar, el segundo término de la ecuación de Ergun es despreciable y, la pérdida de presión es directamente proporcional a la velocidad superficial. En cambio, si el caudal es elevado y, por lo tanto, el régimen de circulación es turbulento, el segundo término es el mayor y no se puede despreciar.

Cuando se ajustan valores experimentales de un lecho cuyas características son desconocidas, se puede hacer mediante la siguiente expresión:

$$\frac{\Delta P}{L} = C_1 \cdot v + C_2 \cdot v^2 \quad (15)$$

5.5.6.2. Métodos de dimensionado de las unidades de adsorción

En este proyecto, la investigación de los métodos de dimensionado se centra en las columnas de adsorción de lecho fijo por razones intrínsecas al dispositivo que se desea diseñar.

Se pueden tomar dos enfoques diferentes para el diseño de lechos fijos. Uno implica la solución rigurosa de las ecuaciones de conservación, transporte y termodinámica. El otro utiliza técnicas de atajo basadas en datos a escala de laboratorio, a escala piloto o a escala industrial. En el primer enfoque, puede requerirse cierto trabajo experimental cuando no hay datos en la bibliografía, pero dada la escasez de datos fundamentales sobre la cinética de adsorción, el diseño de las unidades de adsorción o contactores tanto de lecho fijo como de tanque agitado suele llevarse a cabo mediante métodos

empíricos de atajo. Así que, lo más habitual es primero realizar ensayos a escala de laboratorio y/o planta piloto y, después, extrapolar los resultados a la escala industrial conveniente.

Como ya se ha señalado en el apartado destinado a los lechos de contacto en el punto 5.5.6. Tecnología de las unidades de adsorción, la curva de ruptura de un adsorbato al abrirse paso en un lecho fijo se puede obtener con relativa facilidad a partir de experimentos a escala de laboratorio, a escala piloto o a escala industrial colocando un sensor analítico a la salida del lecho. Para la adsorción de multicomponentes sería necesario tomar muestras del efluente del lecho en diferentes instantes para el posterior análisis de la composición. Mediante esta información se puede definir el instante en el que se produce la ruptura y es posible diseñar un lecho de adsorción fijo sumando las longitudes que corresponden a la porción en equilibrio y a la porción ocupada por la MTZ. La primera longitud puede obtenerse a partir de un simple balance de materia y teniendo en cuenta la relación de equilibrio, mientras que, para obtener la longitud de la MTZ y determinar su velocidad de avance a través del lecho de relleno deben utilizarse técnicas rigurosas y/o de atajo. Cabe señalar que la longitud de la MTZ no puede determinarse de manera fiable únicamente a partir de los conocimientos sobre otros sistemas. La experiencia desempeña un papel fundamental en la contabilización de estos y otros factores de ese tipo. Al planear nuevos procesos es mejor que la curva de ruptura se determine de forma experimental para el sistema particular y en unas condiciones lo más parecidas a las que se encontrarán en la planta.

5.5.6.3. Método LUB

El dimensionado mediante el método LUB se basa en la curva de ruptura del sistema. Se fundamenta mediante la admisión de que la curva de ruptura de una columna de adsorción de lecho a nivel de planta piloto o laboratorio mantiene la misma forma que la curva de ruptura a escala industrial. Funciona particularmente bien en sistemas de un único componente diluido a adsorber y con una isoterma de equilibrio favorable.

El método LUB no necesita valores de coeficientes de transferencia de materia en la fase fluida ni en la fase sólida, sino que usa una aproximación en el cálculo de la rapidez de adsorción suponiendo comportamiento ideal. Como ya se ha discutido en el apartado 5.5.6. Tecnología de las unidades de adsorción, el avance del frente de adsorción en un lecho se puede considerar según dos criterios:

- **Comportamiento real:**

El frente de adsorción avanza sin homogeneidad en la columna y el gradiente de concentraciones adquiere la forma de una curva sinusoidal (forma de *S*) en la denominada zona de transferencia de materia (observar la Figura 44). Por ello, si solo se opera hasta el punto de ruptura existirá una zona del lecho que no se llega a utilizar o a saturar del todo (LUB).

- **Comportamiento ideal:**

Si la transferencia de materia fuese infinitamente rápida, el frente de adsorción sería plano y no existiría una zona de transferencia de materia, sino que solo existiría una única sección de la columna en la que ocurre la transferencia de materia, es decir, el frente de adsorción avanzaría según un modelo de flujo de pistón. De esta forma la columna podría operar hasta un instante (t_s) en el que todo el lecho esté completamente saturado ($L = L_{LES}$).

Si se supone que el proceso de adsorción es ideal y la velocidad de transferencia de materia es tan alta que es instantánea, deja de existir la zona de transferencia de materia ($L_{MTZ} = 0$) y se puede admitir que el equilibrio se alcanza de forma inmediata sin que la curva de ruptura realice esa S característica. Como se puede ver en la Figura 56, la curva de ruptura ideal se asemeja a un escalón en el que el proceso la adsorción acaba de forma repentina en el instante ideal estequiométrico t_s y el lecho es completamente utilizado aprovechando el 100% del adsorbente. Cabe señalar que dicho punto estequiométrico es mayor al instante en el que se produce la ruptura real del lecho ($t_s > t_B$).

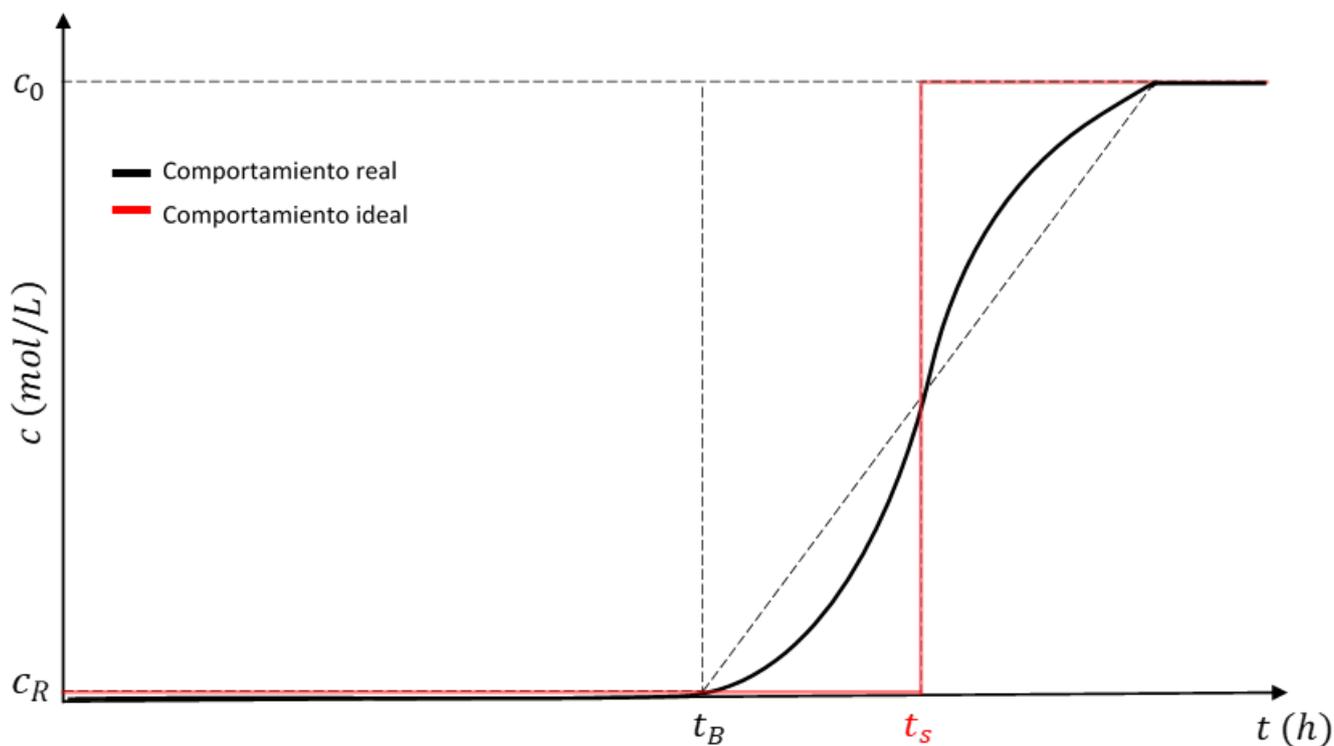


Figura 56: Comparativa de la curva de ruptura con comportamiento real y con comportamiento ideal de adsorción.

Si se cambian la variable concentración (c (mol/L)) representada en el eje de ordenadas de la curva de ruptura por $1 - \frac{c}{c_0}$ (—) es posible resolver gráficamente la integral del balance de materia al componente adsorbible (ecuación (4)). El área bajo la representación debe ser exactamente igual, tanto en el caso de la adsorción ideal (trama roja oblicua), como en el caso de la adsorción real para un tiempo que tienda a infinito (sombreado gris) (Véase la Figura 57) porque al final se alcanza el mismo

equilibrio de adsorción ($q_{a_{eq}}$). Partiendo de esa base, las áreas A y B (trama azul horizontal) deben ser obligatoriamente iguales y, por eso es por lo que el frente de adsorción ideal estequiométrico debe estar ubicado en el centro geométrico de la S siempre.

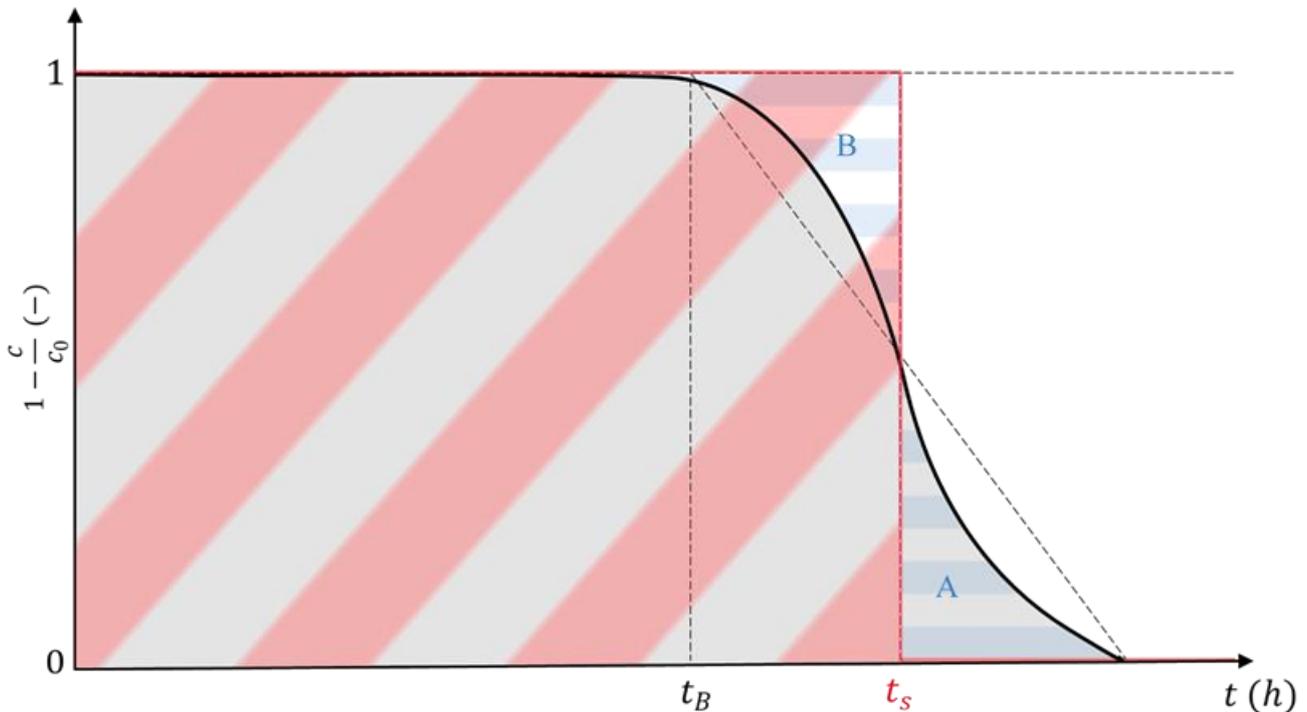


Figura 57: Curvas de ruptura real e ideal seccionadas para la resolución del balance de materia.

Con este enfoque, se puede resolver la integral de forma sencilla al considerar una operación que tiende a un tiempo infinito. Ya que con ambos comportamientos el área debe de ser igual, se puede resolver mediante el comportamiento ideal al ser más sencillo:

$$1 - \frac{c_a}{c_{a_0}} = \begin{cases} 1, & t < t_s \\ 0, & t > t_s \end{cases}$$

$$\int_{t_0=0}^{t=\infty} \left(1 - \frac{c_a}{c_{a_0}}\right) \cdot dt = \int_0^{t_s} \left(1 - \frac{c_a}{c_{a_0}}\right) \cdot dt + \int_{t_s}^{\infty} \left(1 - \frac{c_a}{c_{a_0}}\right) \cdot dt = \int_0^{t_s} 1 \cdot dt + \int_{t_s}^{\infty} 0 \cdot dt = \int_0^{t_s} 1 \cdot dt = t_s$$

Entonces se puede definir la cantidad total adsorbida como se indica en la ecuación (16).

$$m_a \Big|_{t = \infty} = Q_{v_0} \cdot c_{a_0} \cdot t_s \tag{16}$$

Tanto en el caso real como el ideal esta es la cantidad adsorbida total, pero en el caso real solo para procesos de adsorción en los que el tiempo de operación tiende a infinito o sean lo suficientemente grandes como para aproximarse a infinito.

En casos de curva favorables, es decir, cuando la S tiene una gran inclinación y no se dilata mucho en el tiempo, la cantidad adsorbida en el punto de ruptura se puede aproximar a la cantidad adsorbida en el punto de ruptura ideal. Esta aproximación consiste en tomar el área del caso real (sombreado gris) e igualarla al área del caso ideal (trama roja oblicua) para la abscisa t_B . Obviamente el comportamiento de la S depende de lo rápido o lento que se sature el lecho una vez alcance la ruptura. Comportamientos de patrón constante (véase la Figura 48) y caudales bajos favorecen una buena curva para realizar esta aproximación. Si no se puede realizar esta aproximación se debe resolver la integral mediante algún método gráfico o numérico. En el caso del ejemplo propuesto en la Figura 44 sí se podría admitir perfectamente la aproximación puesto que la S esta trazada de forma premeditada y ambas áreas son casi iguales. Por lo tanto:

$$m_a \Big|_{t = t_B} = Q_{v0} \cdot c_{a0} \cdot \int_{t_0=0}^{t=t_B} \left(1 - \frac{c_a}{c_{a0}}\right) \cdot dt \approx Q_{v0} \cdot c_{a0} \cdot \int_{t_0=0}^{t=t_B} 1 \cdot dt = Q_{v0} \cdot c_{a0} \cdot t_B$$

A continuación, teniendo en cuenta la definición de cantidad de sustancia adsorbida por unidad de masa del adsorbente, se puede decir que:

$$q_a = \frac{m_a}{m_b} = \frac{Q_{v0} \cdot c_{a0} \cdot \int_{t_0}^t \left(1 - \frac{c_a}{c_{a0}}\right) \cdot dt}{m_b}$$

Aplicando esta definición para los dos casos estudiados anteriormente ($t = t_B$ y $t = \infty$) resultan las ecuaciones (17) y (18).

$$q_{a\text{eq}} = \frac{m_a \Big|_{t=\infty}}{m_b} = \frac{Q_{v0} \cdot c_{a0} \cdot t_s}{m_b} \tag{18}$$

$$q_a \Big|_{t = t_B} = \frac{m_a \Big|_{t=t_B}}{m_b} = \frac{Q_{v0} \cdot c_{a0} \cdot \int_{t_0=0}^{t=t_B} \left(1 - \frac{c_a}{c_{a0}}\right) \cdot dt}{m_b} \approx \frac{Q_{v0} \cdot c_{a0} \cdot t_B}{m_b} \tag{17}$$

Si se define una nueva variable denominada como fracción de capacidad utilizada ($f_u (-)$) se pueden relacionar las dos ecuaciones anteriores de la forma que indica la ecuación (19).

$$f_u = \frac{q_a \Big|_{t=t_B}}{q_{a_{eq}}} = \frac{Q_{v0} \cdot c_{a0} \cdot \int_{t_0=0}^{t=t_B} \left(1 - \frac{c_a}{c_{a0}}\right) \cdot dt}{Q_{v0} \cdot c_{a0} \cdot t_s} = \frac{\int_{t_0=0}^{t=t_B} \left(1 - \frac{c_a}{c_{a0}}\right) \cdot dt}{t_s} \approx \frac{t_B}{t_s} \quad (19)$$

Como ya lo indica su nombre, la fracción de capacidad utilizada (f_u) describe la fracción de la capacidad de adsorción realmente utilizada cuando ocurre la ruptura. No es más que la cantidad de sustancia adsorbida por unidad de masa del adsorbente ($q_a \Big|_{t=t_B}$) respecto a la cantidad de sustancia adsorbida en el equilibrio por unidad de masa del adsorbente ($q_{a_{eq}}$). De la misma forma, también se puede definir la fracción de capacidad no utilizada (f_{nu}) como la función contraria (véase la ecuación (20)).

$$f_u = 1 - f_{nu} \quad (20)$$

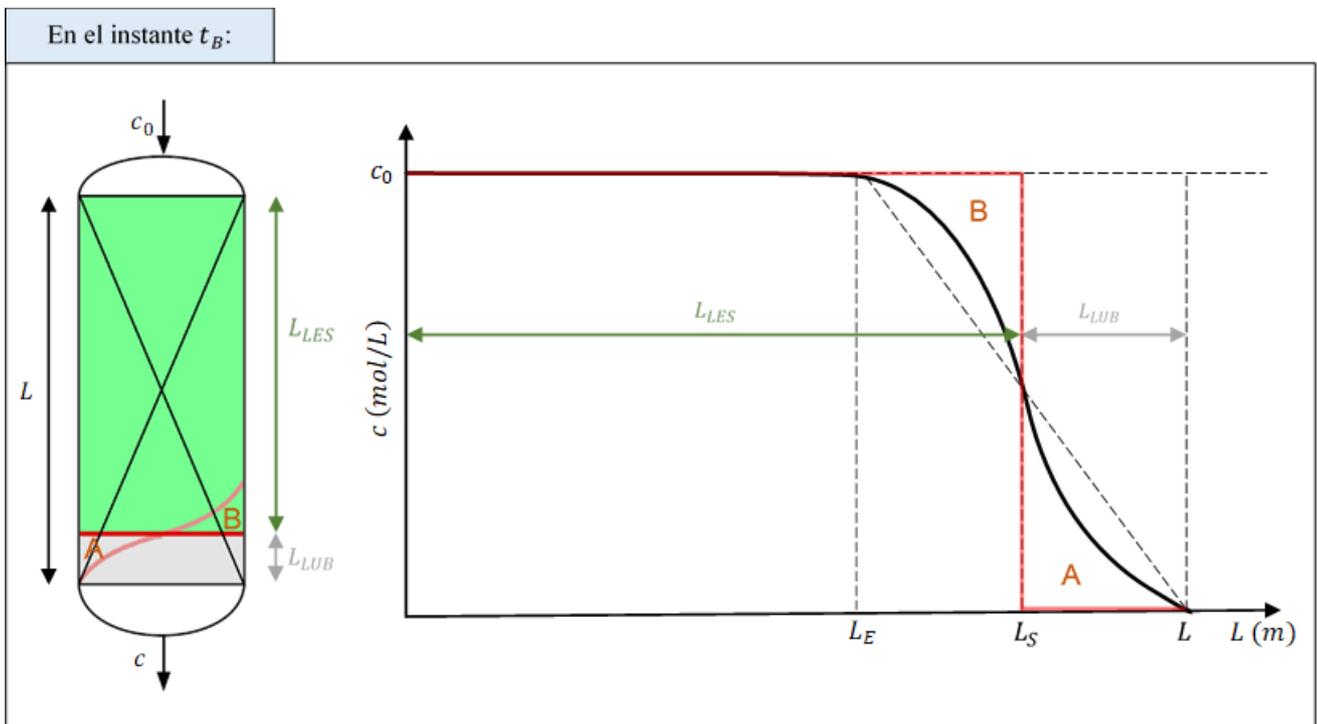


Figura 58: Aproximación realizada en el perfil de concentraciones para incorporar el método LUB.

Teniendo en cuenta la aproximación al comportamiento ideal, aunque el frente de adsorción se ubique en una sección intermedia entre el volumen de B (posterior al frente real sinusoidal) y el volumen de A (anterior al frente real sinusoidal) y se suponga que el lecho ha sido utilizado completamente de la forma indica la Figura 56, como se hace evidente en la Figura 58, en la columna realmente sigue existiendo un volumen de lecho que no ha sido utilizado. Por lo tanto, en el punto de ruptura, la longitud de la columna (L) con la que se ha operado es la suma de la zona en equilibrio (L_{LES}) y la zona no utilizada (L_{LUB}), tal y como indica la ecuación (21):

$$L = L_{LES} + L_{LUB} \quad (21)$$

En conclusión, si la operación dura hasta el instante en que ocurre la ruptura siempre va a haber una zona del lecho que no se llegue a utilizar. Si la sección del lecho es constante a lo largo de toda la columna, la fracción de capacidad utilizada está directamente relacionada con la longitud de la columna y se pueden determinar las partes de la columna de forma fácil mediante las ecuaciones (22) y (23).

$$L_{LES} = f_u \cdot L \quad \rightarrow \quad L_{LES} = \frac{\int_{t_0=0}^{t=t_B} \left(1 - \frac{c_a}{c_{a0}}\right) \cdot dt}{t_s} \cdot L \approx \frac{t_B}{t_s} \cdot L \quad (23)$$

$$L_{LUB} = f_{nu} \cdot L = (1 - f_u) \cdot L \quad \rightarrow \quad L_{LUB} = \left(1 - \frac{\int_{t_0=0}^{t=t_B} \left(1 - \frac{c_a}{c_{a0}}\right) \cdot dt}{t_s}\right) \cdot L \approx \left(\frac{t_s - t_B}{t_s}\right) \cdot L \quad (22)$$

Por lo tanto, al disponer de la curva de ruptura y los datos del montaje experimental, se puede determinar con las anteriores ecuaciones cual es la dimensión del L_{LUB} permanente en esa columna para esa concentración inicial, condiciones de temperatura y presión, caudal de alimentación, cantidad del lecho, etc. Las condiciones principales para poder aplicar esta metodología son:

- 1) Mantener unas condiciones de temperatura y presión constantes durante toda la operación.
- 2) Mantener una alimentación a la columna de caudal constante durante toda la operación.
- 3) Mantener una alimentación a la columna de concentración constante durante toda la operación.
- 4) Poder suponer que la temperatura, la concentración y la velocidad no varían en dirección radial y solo cambia en la dirección longitudinal del lecho.
- 5) El adsorbente inicialmente se encuentra limpio.
- 6) La isoterma de adsorción del sistema debe ser favorable para poder suponer comportamiento de patrón constante para que la L_{MTZ} tenga la misma amplitud en todas las iteraciones al sólo depender de la combinación adsorbato-adsorbente, la temperatura y la velocidad del fluido. Si la L_{MTZ} tiene la misma amplitud siempre, también L_{LUB} tiene la misma amplitud constante siempre.
- 7) El proceso de adsorción debe mantenerse isoterma. Para más detalle acudir al análisis hecho al final del apartado 5.5.4. Cinética.
- 8) La columna debe ser suficientemente larga para contener varias longitudes de L_{MTZ} .

Funciona particularmente bien en sistemas de un único componente diluido y con una isoterma de equilibrio favorable. No debería ser usado para sistemas de adsorción con isotermas desfavorables y en el caso de isotermas lineales se deberá prestar especial atención.

Para realizar el escalado a tamaño industrial se debe poder admitir que la curva de ruptura a nivel de planta piloto o laboratorio tiene la misma forma que la curva de ruptura a escala industrial. Este requisito sólo puede satisfacerse cuando se cumplen las siguientes condiciones entre la escala industrial (subíndice 2) y la escala piloto o de laboratorio (subíndice 1):

- 1) Similitud geométrica entre ambas escalas $\left(\frac{L_1}{D_1} \approx \frac{L_2}{D_2}\right)$.
- 2) Similitud térmica entre ambas escalas $(T_1 \approx T_2)$.
- 3) Similitud cinemática. Las propiedades físicas del fluido se mantienen similares para garantizar el mismo régimen de transferencia de materia en ambas escalas.
- 4) Similitud dinámica $(Re_{m_1} \approx Re_{m_2})$.
- 5) Usar el mismo adsorbente y fluido en ambas escalas.
- 6) Usar la misma concentración constante de alimentación en ambas escalas $(c_{0_1} \approx c_{0_2})$.
- 7) La velocidad superficial del líquido debe ser baja para asegurar un menor error al aproximar la curva al escalón ideal. Esta condición se desarrolla más en el punto 3 del procedimiento.
- 8) El lecho debe estar bien empaquetado y asegurar una buena distribución de la mezcla. Si existen discrepancias en la cantidad de materia dispersada en los ejes axiales entre una columna y otra, existe también riesgo de discrepancias en los resultados.

Si se cumplen todas las condiciones anteriores, se puede decir que la cantidad de sustancia adsorbida en el equilibrio por unidad de masa del adsorbente (q_{aeq}), tiene exactamente el mismo valor para ambas escalas ya que es un parámetro característico del adsorbente para un sistema concreto. Por lo tanto, definiendo los siguientes parámetros de diseño:

- Caudal de alimentación (Q_{v0_2}).
- Concentración de la alimentación (c_{a0_2}).
- Área de la sección del lecho (A_2).
- Altura del lecho (L_2).

Se puede llegar a determinar el tiempo que tarda en ocurrir la ruptura del lecho. El procedimiento es el que se explica a continuación:

1. Se puede considerar que el tamaño de L_{LUB_2} realmente es directamente proporcional al tamaño de la L_{MTZ_2} , por lo tanto:

$$L_{LUB_2} \propto L_{MTZ_2} \propto \frac{v'_2 \cdot D_{p_2}^2}{D_{e_2}}$$

Como también se puede decir lo mismo para la escala piloto/laboratorio, se pueden igualar ambas ecuaciones:

$$\frac{L_{LUB_2}}{L_{LUB_1}} = \frac{v'_2 \cdot D_{p_2}^2 \cdot D_{e_1}}{v'_1 \cdot D_{p_1}^2 \cdot D_{e_2}}$$

Ahora, teniendo en cuenta que el adsorbente utilizado en ambas escalas es del mismo tamaño y la difusividad efectiva también debe ser equivalente por las condiciones de similitud, se puede decir que se cumple la siguiente ecuación (24):

$$\frac{L_{LUB_2}}{L_{LUB_1}} = \frac{v'_2}{v'_1} = \frac{v_2 \cdot \varepsilon_{Lecho_2}}{v_1 \cdot \varepsilon_{Lecho_1}} \approx \frac{v_2}{v_1} \quad (24)$$

Cabe señalar que, para velocidades superficiales iguales en ambas disposiciones, el tamaño de lecho no utilizado es el mismo ($L_{LUB_1} = L_{LUB_2}$) independientemente del resto de variables.

2. Así, con la ecuación (24) ya se puede determinar el L_{LUB_2} y restárselo a la longitud total de la columna para conocer cuál es la cantidad de lecho realmente aprovechado (V_{LES_2}):

$$\frac{V_2}{A_2} = L_2 = L_{LES_2} + L_{LUB_2} = \frac{V_{LES_2} + V_{LUB_2}}{A_2} \quad \rightarrow \quad V_{LES_2} = L_2 \cdot A_2 - V_{LUB_2} \quad (25)$$

3. Ahora ya conociendo la cantidad de lecho que sí es completamente aprovechada, se puede aplicar el enfoque ideal y decir que V_{LES_2} se corresponde con la cantidad de sustancia adsorbida en el punto de ruptura. Nótese que también se podría diseñar fijando un valor de tiempo de ruptura y determinando la altura de lecho utilizado con las anteriores ecuaciones.

$$V_{LES_2} = \frac{m_{b_2} \Big|_{t=t_{B_2}}}{\rho_{Lecho}} = \frac{m_{a_2} \Big|_{t=t_{B_2}}}{q_{a_{eq}} \cdot \rho_{Lecho}} = \frac{Q_{v_0} \cdot c_{a_0} \cdot \int_{t_0=0}^{t=t_{B_2}} \left(1 - \frac{c_a}{c_{a_0}}\right) \cdot dt}{q_{a_{eq}} \cdot \rho_{Lecho}} \approx \frac{Q_{v_0} \cdot c_{a_0} \cdot t_{B_2}}{q_{a_{eq}} \cdot \rho_{Lecho}} \quad (26)$$

$$t_{B2} \approx \frac{\rho_{Lecho} \cdot q_{a_{eq}} \cdot V_{LES2}}{Q_{v_{O_2}} \cdot c_{a_0}} \quad (27)$$

De esta forma, se aproxima que L_{LES2} se trata de la longitud de columna ideal. Al hacer esta aproximación hay que tener en cuenta que normalmente no se puede asumir que el punto de ruptura real (t_B) coincide con el punto ideal de ruptura (t_S) sino que, normalmente, es menor ($t_B < t_S$, tal y como se puede observar en la Figura 56). En consecuencia, para poder aplicar esta aproximación debe de conseguirse que la curva de ruptura real sea lo más pronunciada y corta posible para acercarla al comportamiento ideal. Esto se puede conseguir manipulando el caudal de la forma que se indica a continuación:

Sabiendo que el área del lecho es constante, la única forma de variar el caudal es mediante la velocidad superficial del fluido ($Q_{v_0} = A \cdot v$). Variar esta velocidad implica variar el caudal y, por tanto, el tiempo de residencia (o *EBCT* (s)) o, lo que es lo mismo, el tiempo de contacto entre ambas fases. A mayor velocidad, menor tiempo de contacto, lo que implica una curva de ruptura mucho más ancha y alejada del comportamiento ideal. En conclusión, se requieren velocidades superficiales pequeñas para poder asumir la aproximación a comportamiento ideal. En la Figura 59 se puede ver un claro ejemplo de cómo influye la velocidad superficial en la curva de ruptura.

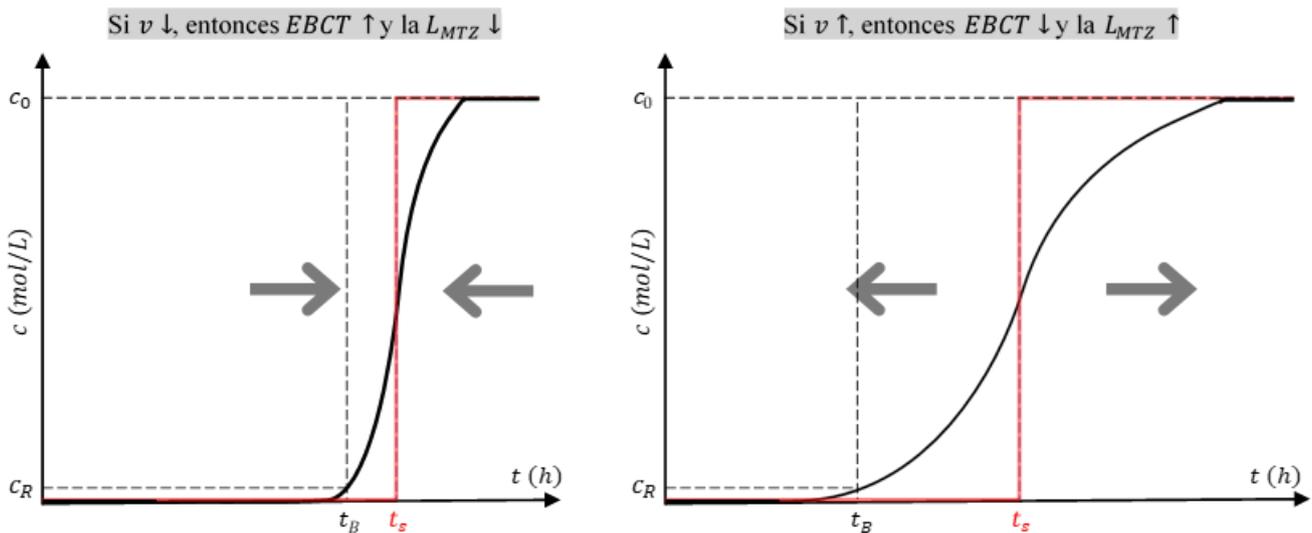


Figura 59: Comparativa entre curvas de ruptura al operar con diferente caudal.

Cabe señalar también que, fijando la velocidad superficial, un área de lecho (A (m²)) mayor implica que, además de aprovechar mayor cantidad de adsorbente, la L_{MTZ} se estreche produciendo el mismo fenómeno explicado en la Figura 59 para la velocidad, pero de forma inversa. Cuando se habla de que la L_{MTZ} se estrecha, significa también que la L_{LUB} es menor y mayor cantidad del lecho es aprovechada.

En conclusión, mediante un experimento a pequeña escala para obtener la curva de ruptura, cumpliendo ciertas condiciones y fijando algunos parámetros a escala industrial, se puede realizar el diseño industrial mediante un escalado con el método LUB. Como se observa en la Figura 60 se diseña el lecho para que opere solo hasta el punto de ruptura, pero se incorpore más lecho del que se va a utilizar. El diseño no abarca la totalidad de la curva de ruptura porque no tiene sentido incorporar más lecho si no va a ser necesario, es una pérdida de materiales y de capital. Aun así, sí que es necesario incorporar ese L_{LUB} permanente para asegurarse del buen funcionamiento de la columna hasta alcanzar el punto de ruptura permitiendo que la MTZ tenga el suficiente espacio en el lecho.

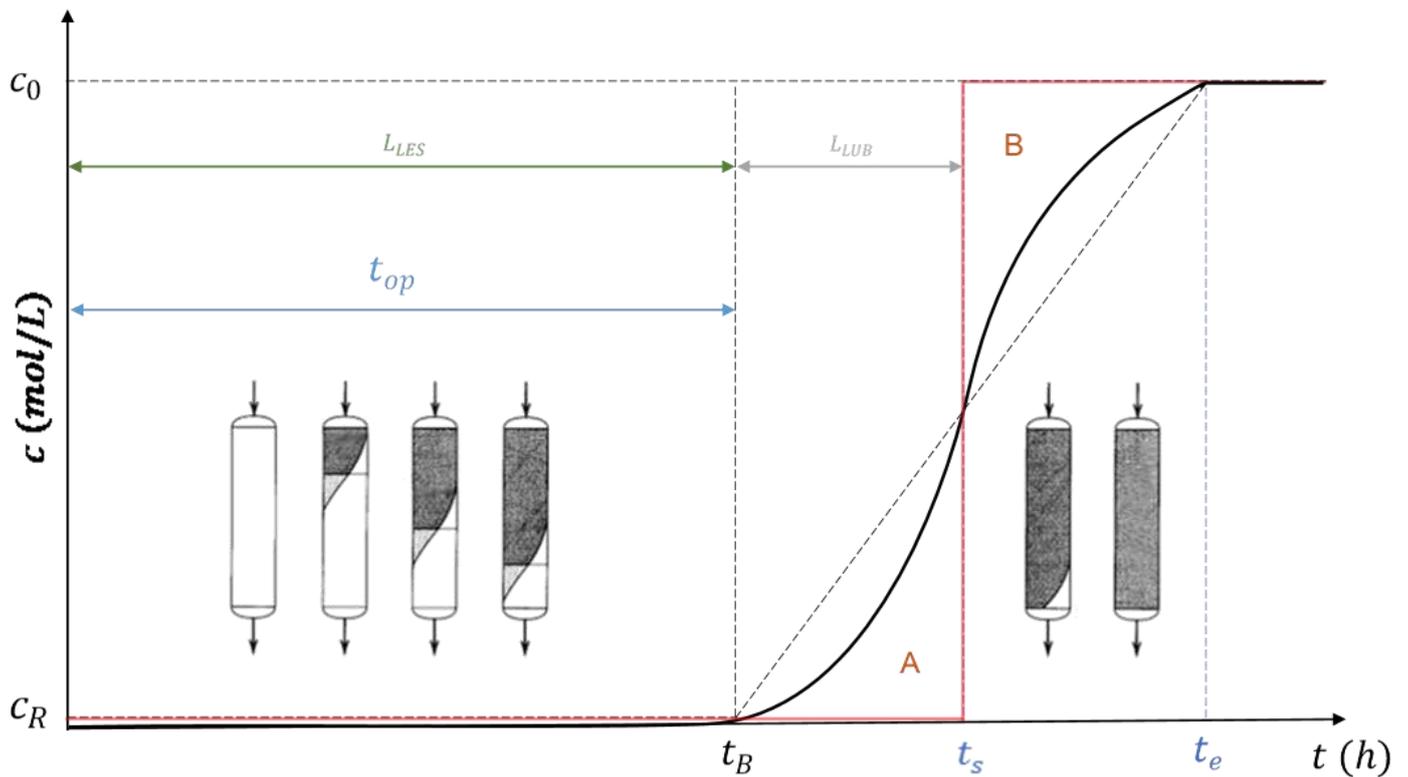


Figura 60: Curva de ruptura con las simplificaciones del Método LUB.

6. Análisis de soluciones

Hay que aclarar que en relación con lo explicado en el punto 5.3. Depuración del agua residual en el sector cerámico, este proyecto trata el caso de una empresa en la que la elaboración del polvo atomizado no se realiza en la misma planta cerámica y las actividades de fabricación de los esmaltes, fritas u otros acabados estéticos no se incluyen tampoco en el alcance de esta empresa, aunque si su aplicación durante el proceso de producción. Además, la depuración objetivo de este proyecto solo se realiza a una corriente de purga (excedente) del sistema interno de aguas residuales de la planta. En la Figura 61 se puede observar el balance hídrico aproximado de la empresa y un indicador del punto donde se implementa el tratamiento en cuestión.

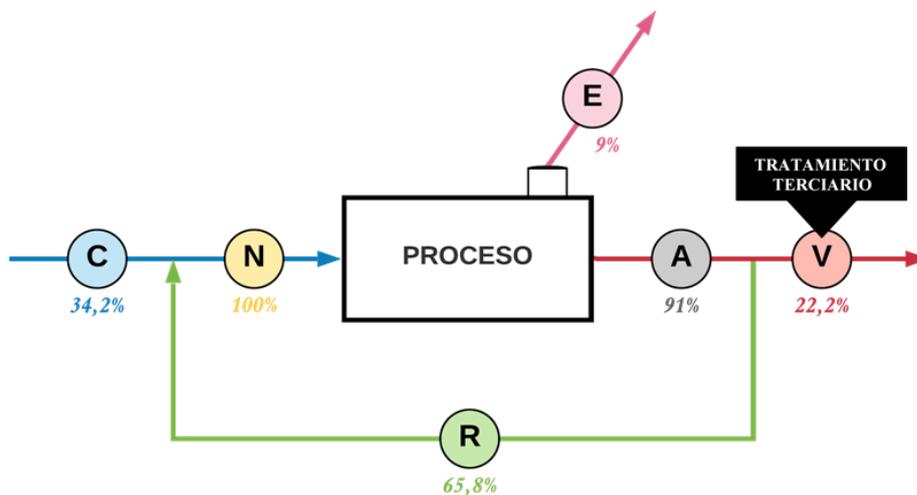


Figura 61: Balance hídrico aproximado de la empresa problema.

Cabe tener en cuenta que el caudal de $4,4 \text{ m}^3/\text{h}$ de agua residual que se desea verter proviene de un tratamiento fisicoquímico tradicional como el explicado en el apartado 5.3. Depuración del agua residual en el sector cerámico (véase la Figura 62). Este tratamiento está constituido por una primera sedimentación física que se ocupa de eliminar los sólidos más gruesos y una segunda sedimentación fisicoquímica encargada de los sólidos más finos. También cuenta con una balsa final de homogeneización y aireación de la que se extraen ambos caudales (reciclado y vertido).

Una vez definidas exactamente cuáles son las actividades en las que participa la empresa y el tratamiento que se realiza al agua residual, cabe realizar un análisis de porque se ha optado por solucionar su problema de aguas residuales mediante un dispositivo de adsorción y no por otro método más convencional, al menos en lo que atañe a problemas con boro disuelto:

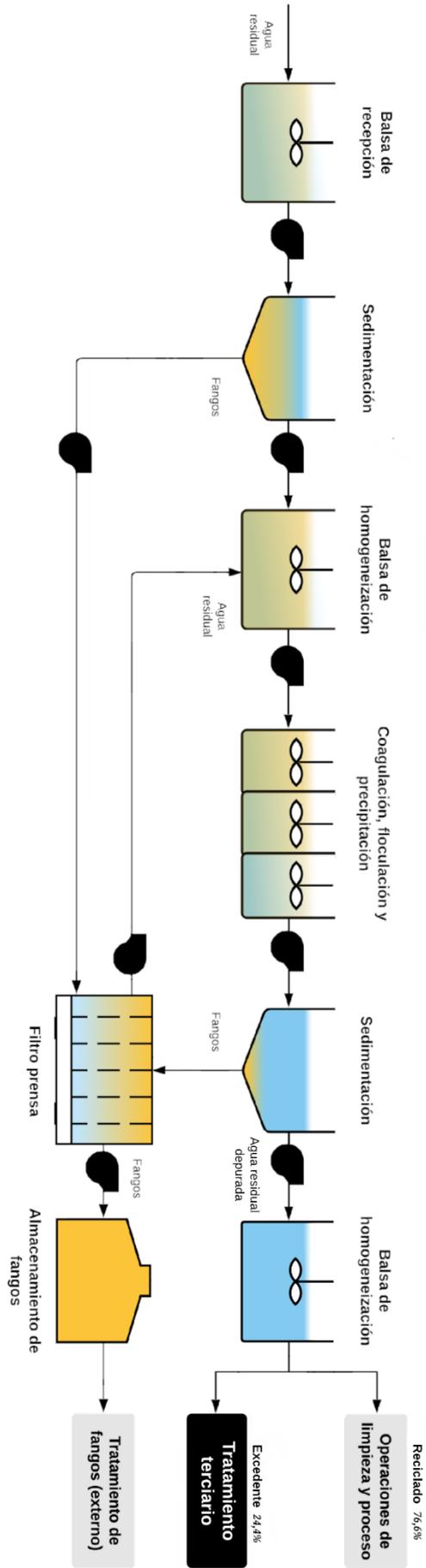


Figura 62: Tratamiento fisicoquímico anterior al tratamiento terciario.

No se puede pasar por alto la alta efectividad de los tratamientos de depuración con ósmosis inversa, puesto que, como ya se ha justificado en los antecedentes con los datos pertinentes, se trata de la tecnología de purificación de agua residual más efectiva actualmente. Aun teniendo en cuenta este innegable hecho, existen ciertas desventajas respecto a su empleo que ponen en duda si en este caso concreto su aplicación es la mejor opción. Estos inconvenientes principalmente están correlacionados con la dinámica intrínseca al fenómeno de ósmosis inversa, ya que, en estas operaciones, el coste de explotación suele ser especialmente caro debido a las altas presiones requeridas para alcanzar buenas depuraciones. Este coste energético hace que muchos inversores duden si incorporar estas operaciones en sus empresas ya que quizá una tecnología de menor prestigio o necesidades de operación menos exigentes podrían conseguir unos resultados aceptables sin tener que recurrir a la efectiva, pero costosa, ósmosis inversa. Otro problema que surge es que la conversión no es del 100% ya que aparecen corrientes de retentado con concentraciones en contaminantes mucho más altas a las iniciales y para conseguir aproximar el índice de conversión a un valor cercano al 100% es necesario incorporar varias etapas de carcasa que, de nuevo, implican además de una mayor inversión inicial, un aumento en el coste general de explotación. Otros inconvenientes agregados a la aplicación de la ósmosis inversa también son la necesidad de incorporar un pretratamiento muy exhaustivo que no comprometa la integridad de las delicadas membranas usadas y los estrictos límites impuestos de variación del *pH*, la temperatura u otras propiedades de las corrientes contaminadas para no dañar este sistema de membranas. También cabe señalar que en el caso estudiado es posible que la concentración de boro, así como la del resto de contaminantes, ni si quiera sea tan alta como para necesitar una depuración tan primorosa como lo es la ósmosis inversa. Más, teniendo en cuenta que el agua con la que se trabaja procede ya de una depuración previa que, aunque sea de carácter fisicoquímico ha minorizado bastante los requisitos del tratamiento.

Debido a estos motivos la oposición a incorporar un sistema de ósmosis inversa es de peso en muchas empresas, al igual que en este proyecto, y, por ello, un sistema alternativo que consiga buenos resultados sin involucrar desembolsos económicos tan grandes resulta una idea muy atractiva. En cuanto al resto de las tecnologías usadas habitualmente en la eliminación de los compuestos de boro, por un lado, el intercambio iónico difícilmente sería adaptable a la disposición en continuo que se está buscando, ya que la velocidad de la depuración se vería entorpecida por la alta cantidad de etapas necesarias para conseguir eficiencias suficientemente buenas en la eliminación, mientras que, por el otro lado, la electrodiálisis también podría suponer una ralentización muy grave en la purificación debido a las limitaciones intrínsecas a aplicar un campo eléctrico al agua residual, pudiendo producirse el fenómeno de disociación del agua, además el consumo energético también podría dispararse sin realmente conseguir unos beneficios suficientes.

Por los argumentos expuestos anteriormente y la expectación ante la posible aparición de una nueva vía de depuración de boro para concentraciones moderadas o bajas, en este proyecto se decide implementar la adsorción como la forma de resolver el problema de aguas residuales en las empresas

productoras de baldosas cerámicas. Esta alternativa podría suponer un cambio de paradigma en los tratamientos de depuración de los compuestos de boro en efluentes acuosos y posiblemente reducir la inversión económica y el coste implicado en una instalación destinada a este objetivo.

En definitiva, la opción elegida para conseguir depurar efectivamente los compuestos de boro de las aguas residuales industriales de esta empresa, así como el resto de posibles contaminantes presentes en menor medida en los excedentes, es la incorporación de un tratamiento terciario que utilice la tecnología de los lechos fijos de adsorción con un adsorbente químicamente tratado (carbón activo granular impregnado de ácido cítrico) para incrementar la retención del boro.

Cabe destacar que la gestión actual de transportar el agua residual en camiones cuba tiene una dudable rentabilidad debido a la lejana ubicación de las empresas productoras de materias primas para el soporte cerámico respecto al lugar donde se encuentra la planta de producción de baldosas en cuestión. Si no fuera por esa distancia de 39 km, no habría duda de que la opción más rentable es el transporte del agua, además, por esta elevada rentabilidad es por lo que la mayor parte de las empresas cerámicas optan por esta opción. Aun así, cabe la posibilidad de que el tratamiento propuesto no consiga un alivio económico respecto a la gestión actual, en ese caso el proyecto serviría como una reafirmación de que la gestión actual es la más válida con relación a la tecnología disponible hoy en día.

En cuanto a la impregnación y gestión del carbón activo impregnado y no impregnado que se utiliza en el tratamiento terciario, después de establecer contacto y afianzar relaciones con una empresa dedicada a la producción y distribución de carbón activo y columnas de lecho fijo, se establecen los siguientes acuerdos:

- La empresa externa se compromete a proporcionar un servicio que incluye la preparación del carbón activo granular impregnado con ácido cítrico, así como del carbón activo granular no impregnado y la instalación de estos adsorbentes en columnas de lecho fijo que transportará e instalará en la planta. La gestión del GAC una vez saturado corre a cuenta de esta empresa.
- A cambio de esta gestión, se contrata una tarifa en la que se establecen pagos fijos por cada recambio de columna y pagos relativos al tonelaje de carbón activo instalado al año.

Es importante destacar que la gestión del GAC saturado corre a cuenta de esta empresa externa, así como la instalación y gestión de la columna de lecho fijo, es decir, cuando la columna alcanza el punto de ruptura y queda fuera de servicio es desacoplada y recambiada siguiendo una programación establecida previamente (véase la Figura 63). De esta forma, la columna que contiene el lecho saturado se carga en un camión y se transporta hasta el centro logístico de la empresa externa para ser recambiada por otra que contiene adsorbente limpio. Ambos trayectos de ida y vuelta están incluidos en el contrato.

Esta empresa, a pesar de trabajar con GAC habitualmente, no dispone de experiencia tratando boro mediante carbón activo, por lo que el diseño de la columna corre plenamente a cuenta de la empresa interesada en tratar sus aguas residuales. A pesar de esto, la empresa externa se compromete a suministrar el carbón activo impregnado necesario para permitir la construcción de una planta experimental a nivel de laboratorio para que la empresa cerámica pueda investigar la adsorción y diseñar el dispositivo a partir de un escalado con el Método LUB ya explicado en el apartado 5.5.6.3. Método LUB.



Figura 63: Operaciones de recambio de columna de lecho fijo rellena de carbón activo.

Además de esta columna para la separación del boro, también se planea la incorporación de columnas de lecho fijo rellenas de carbón activo granular no impregnado para adsorción de orgánicos, así como varios filtros de arena previos a las unidades de adsorción para evitar el acceso de sólidos que puedan colmatar los lechos fijos de adsorción y aumentar la pérdida de presión. Estas unidades de adsorción de orgánicos son precisas para poder alcanzar la calidad necesaria en el agua y poder reutilizarla en el sector agrícola como agua de riego (véase la Tabla 7). A continuación, en el apartado 7. Requisitos de diseño se explica con mayor profundidad la composición del tratamiento terciario.

7. Requisitos de diseño

Como ya se ha descrito anteriormente, la empresa ya cuenta con un tratamiento de depuración de naturaleza fisicoquímica (véase la Figura 62). De esa agua residual depurada solo un excedente que supone el 24,4% del total es conducido al tratamiento terciario ($4,4 \text{ m}^3/\text{h}$).

A continuación, con el fin de definir cuáles son exactamente los contaminantes a los que se enfrenta el tratamiento terciario y justificar las tecnologías, además del lecho de adsorción para eliminar el boro, que se incorporan al tratamiento, se muestra la caracterización promedio de las aguas residuales en la salida de la balsa de homogeneización final del tratamiento tradicional en la Tabla 16:

Tabla 16: Análisis químico promedio de las aguas residuales en la salida de la balsa de homogeneización final del tratamiento fisicoquímico.

Parámetro	Valor	Parámetro	Valor
<i>pH</i>	7,8	<i>Boro (mg/L)</i>	10
<i>Conductividad ($\mu\text{S}/\text{cm}$)</i>	2150	<i>Fluoruros (mg/L)</i>	0,3
<i>DBO₅ (mg O₂/L)</i>	55	<i>Cloruros (mg/L)</i>	540
<i>DQO (mg O₂/L)</i>	122	<i>Sulfatos (mg/L)</i>	500
<i>Sólidos en suspensión (mg/L)</i>	22		

Puesto que se desea destinar el agua al vertido a actividades agrarias, en concreto, el riego de cultivos, la calidad del agua pertenece al grupo 2 de la Tabla 7 del apartado 5.3.1. Regulación de la reutilización de aguas depuradas. Ya que no se desea limitar su reutilización a una única categoría, se toma la CALIDAD 2.12 a) Riego de cultivos con sistema de aplicación del agua que permita el contacto directo del agua regenerada con las partes comestibles para alimentación humana en fresco, como la referencia a seguir puesto que implica las limitaciones más exigentes de todo el grupo 2. Cabe añadir que también existe la posibilidad de reutilizar esta agua tanto para limpieza como en el proceso de fabricación puesto que la CALIDAD 3.1 a) Aguas de proceso y limpieza excepto en la industria alimentaria, tiene límites menos restrictivos a los requeridos para poder destinar el agua a regadío.

En conclusión, los requisitos de diseño consisten en mantener las propiedades químicas del agua residual tratada por debajo de los valores descritos en la categoría 2.12 a) Riego de cultivos con sistema de aplicación del agua que permita el contacto directo del agua regenerada con las partes comestibles para alimentación humana en fresco. Para poder alcanzar esta meta es necesario disminuir los valores de la *DBO₅* de forma que se limite la presencia de microorganismos perniciosos, los sólidos en

suspensión también deben disminuir ligeramente para no exceder el valor máximo (20 mg/L), el Boro y sus compuestos deben reducirse para no superar el límite ($0,5 \text{ mg B/L}$) y el pH se ha de mantener dentro de un rango aceptable ($7 - 8$).

8. Descripción del proceso

En este apartado se describe en profundidad las operaciones que se llevan a cabo en el tratamiento terciario diseñado, de forma que se consigan cumplir los objetivos de depuración del agua expuestos en el apartado 7. Requisitos de diseño y los objetivos descritos en el apartado 2. Objetivos en lo referente al tratamiento de depuración del agua.

Así pues, el tratamiento terciario puede dividirse en las dos fases que van a ser descritas a continuación:

- **Primera fase (filtración de sólidos suspendidos y reducción de DQO):**

Esta primera fase está constituida por una etapa de filtración de sólidos suspendidos mediante un filtro de profundidad con arena y otra etapa contigua de adsorción con carbón activo mediante dos columnas de adsorción de lecho fijo en paralelo. Con la acción de esta fase inicial se obtiene un agua libre de sólidos y una DQO muy baja. Gracias a este “pretratamiento” se protege la operación de adsorción con carbón activado posterior del taponamiento con sólidos y se potencia una adsorción más selectiva de los compuestos de boro. Finalmente, esta primera fase acaba con una balsa pulmón que permite almacenar el agua por un día, permitiendo un tiempo de respuesta suficiente en caso de avería o si se procede al recambio de las columnas de adsorción con carbón activo impregnado. Además de las prestaciones mencionadas, esta balsa pulmón da la opción de que el agua “pretratada” pueda ser reutilizada en etapas de lavado u operativas internas de la propia empresa en caso de necesidad, o, por el contrario, continuar siendo tratada en una segunda fase especializada en la eliminación de compuestos disueltos de boro.

- **Segunda fase (reducción de compuestos de boro, regulación del pH y desinfección):**

A partir de la balsa pulmón, el agua es llevada a un reactor para elevar el pH por la acción de hidróxido de sodio ($Na(OH)$) para favorecer la adsorción de los compuestos de boro en la etapa de adsorción con carbón activado impregnado posterior. Esta adsorción ocurre en tres columnas de lecho fijo dispuestas en paralelo. Después de esta operación, el agua es enviada a un tanque de reducción del pH con ácido clorhídrico (HCl) de forma que se neutralice la subida anterior y se regule el parámetro dentro de un rango aceptable. A continuación, el agua pasa mediante rebose a un tanque de cloración que mediante la adición de hipoclorito de sodio ($NaClO$) desinfecta el agua y añade cierta carga de cloro residual. Para acabar, el agua se almacenada en un tanque final de almacenamiento a partir del cual se puede verter el agua para su posterior utilización en la agricultura como agua de riego, o incluso reutilizarse en la propia empresa.

En la siguiente Figura 64 se presenta un diagrama de flujo del tratamiento descrito. Seguidamente, se describe de forma más precisa el proceso que sigue el agua en este tratamiento terciario.

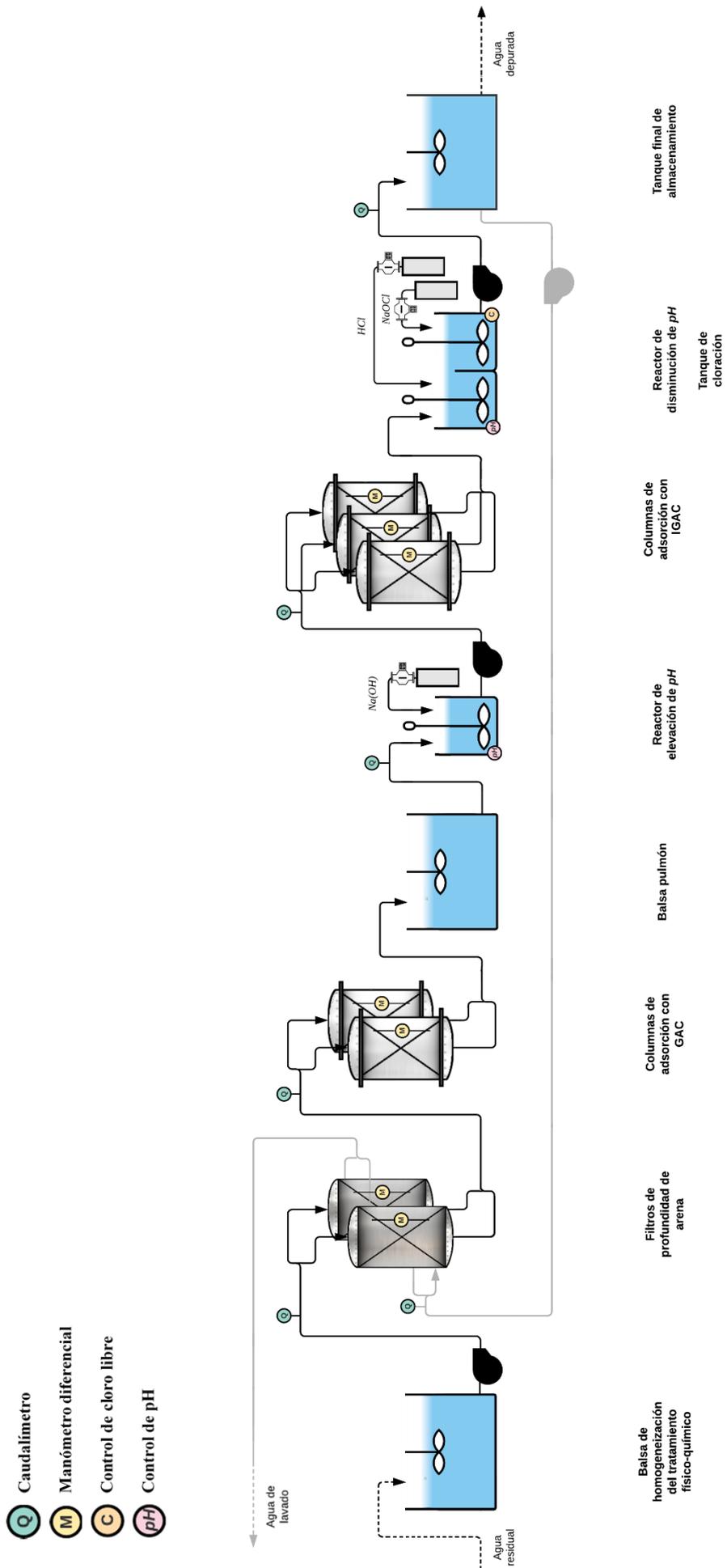


Figura 64: Diagrama de flujo del tratamiento terciario.

- **Filtros de profundidad de arena:**

El agua residual destinada al tratamiento terciario es bombeada desde la homogeneización final del tratamiento primario (véase la Figura 62) hasta un filtro de profundidad semicontinuo de flujo descendiente.

Esta filtración tiene la función de separar los sólidos en suspensión que contiene el fluido. Esta acción se consigue haciendo al fluido atravesar un medio sólido cuyas oquedades permiten su paso, pero retiene los sólidos más gruesos que el espacio disponible. Los más utilizados en la industria cerámica son los filtros de profundidad.

En el interior de este dispositivo el agua se distribuye de forma equivalente por toda la sección y fluye desde la parte superior del lecho filtrante hasta la parte inferior (véase la Figura 65), de modo que, si algún sólido en suspensión ha escapado de las sedimentaciones anteriores del tratamiento fisicoquímico queda atrapado en la arena. Además de esta retención de sólidos, estos equipos también consiguen disminuir la turbidez del agua mejorando su transmitancia.

A continuación, en la Tabla 17 se describen las características principales de la arena utilizada para conformar el lecho de esta operación de filtración:

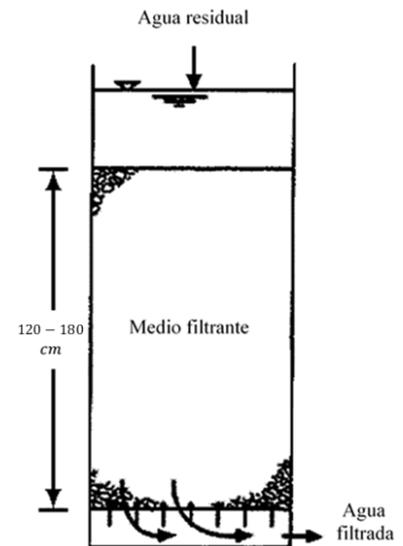


Figura 65: Funcionamiento del filtro de profundidad con arena.

Tabla 17: Caracterización de la arena de los lechos de profundidad.

Parámetro	Valor
Granulometría (<i>mm</i>)	0,75 – 0,85
Diámetro de grano medio equivalente, $D_{p_{eq}}$ (<i>mm</i>)	0,987
Porosidad de lecho, ϵ_T	0,4

Como se puede observar en la Figura 66, debido a la retención de sólidos, los filtros se van colmatando con el transcurso de la operación, provocando un aumento en la pérdida de presión y un mayor tiempo de filtrado. A la vez, al haber menor espacio de paso, la filtración es más efectiva y, en consecuencia, el efluente de mayor calidad. Aunque una mejor filtración es positiva, se debe establecer un compromiso entre pérdida de presión máxima admisible y calidad máxima el efluente para que el tiempo de la operación no sea excesivo

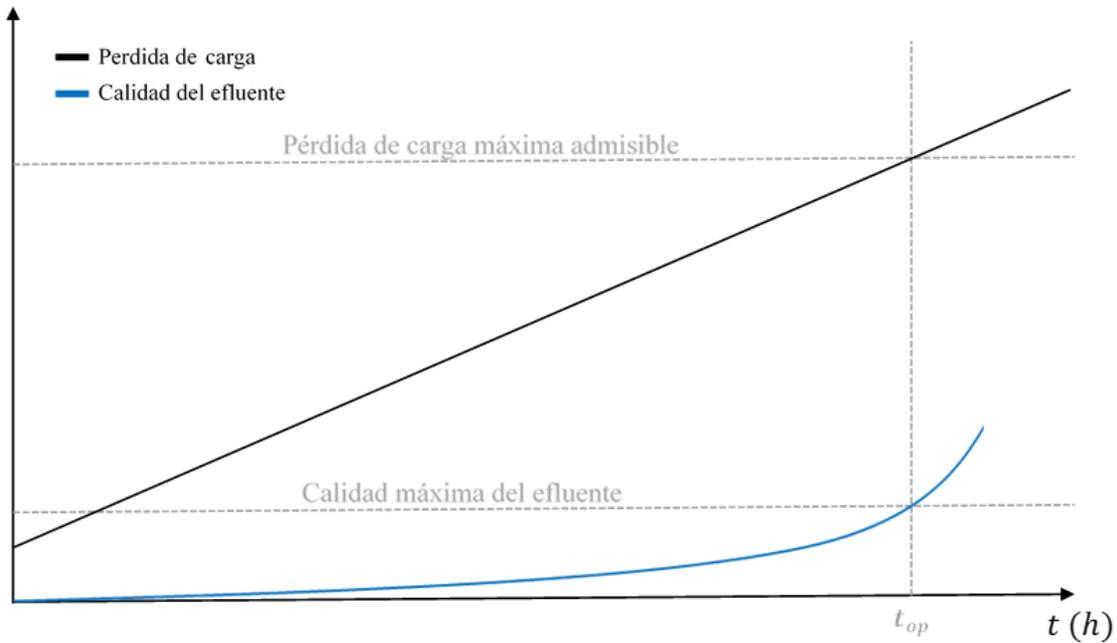


Figura 66: Gráfico descriptivo de la dinámica de filtración a lo largo del tiempo.

Para evitar la obstrucción de la arena se realizan contralavados periódicos que consisten en la limpieza del lecho con la misma agua ya depurada del tratamiento. El agua extraída de este contralavado es conducida de nuevo al inicio de la depuración (la balsa de recepción del tratamiento primario).

Con el fin de favorecer la continuidad del tratamiento, se instalan dos equipos de filtración en paralelo en lugar de uno. De esta forma, cuando uno de los filtros se encuentra en etapa de operación, el otro se encuentre en etapa de limpieza y así alternativamente. La disposición de la operación de filtración es la representada en la Figura 67.

Para conocer el momento exacto en el que se debe de parar la etapa de operación y dar comienzo a la etapa de limpieza se añade un medidor de la diferencia de presión en el lecho filtrante. Cuando el valor registrado alcance cifras indeseadas y el proceso se vea excesivamente ralentizado será indicativo para dar comienzo a la etapa de limpieza. También se puede monitorizar la cantidad de líquido almacenada en la cámara superior del nivel de la arena mediante un medidor de nivel para saber cuándo la diferencia de presión es demasiado alta y es necesaria la limpieza.

La secuencia de funcionamiento del filtro es la siguiente:

Para empezar con la etapa de filtración se procede con la apertura de las válvulas que permite la entrada y la salida de agua del filtro, mientras que del resto de válvulas permanecen cerradas. Una vez la presión diferencial es inaceptable o el nivel por encima del lecho supera su valor límite, esta etapa operativa finaliza y se da comienzo a la etapa de lavado del filtro. Para llevar a cabo esta limpieza se cierra la válvula de entrada anteriormente abierta y, seguidamente, la válvula de salida cuando el nivel de agua en el filtro descienda hasta el borde del aliviadero. A continuación, se abren las valvulas de

entrada y salida para permitir que el agua de lavado fluya en sentido ascendente a través del medio filtrante, con la posibilidad de expandir la arena y limpiar los sólidos acumulados en su superficie de la misma, arrastrandolos fuera. El agua de lavado se envía a cabeza de la planta de tratamiento.

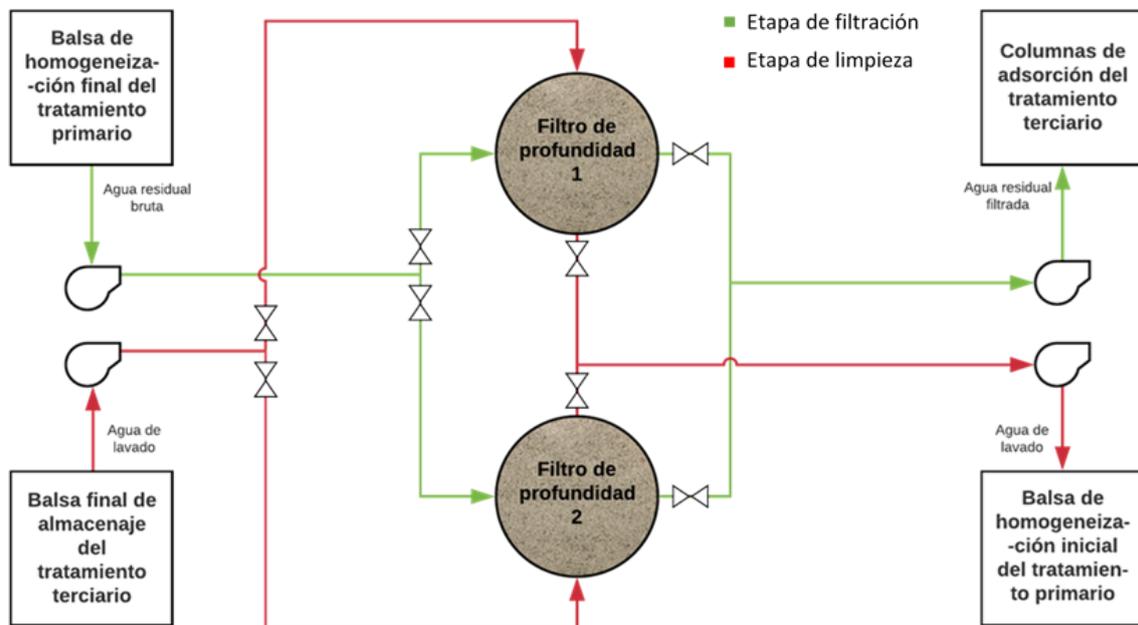


Figura 67: Esquema de la disposición de los filtros de profundidad.

- **Columna de adsorción con GAC:**

Una vez el agua ha sido filtrada es conducida hacia un grupo de columnas de adsorción con lecho de GAC. La función principal de estos equipos es la disminución de la DQO del agua, aunque también es de esperar la adsorción de otras sustancias disueltas en el agua. Estas columnas son de vital importancia en la planta para evitar que las posteriores columnas de adsorción con GAC impregnado se saturen de sustancias que no sean compuestos de boro.

En el interior de estas dos columnas en paralelo, el agua se distribuye de forma equivalente por toda la sección y fluye desde la parte superior del lecho adsorbente hasta la parte inferior, permitiendo un contacto estrecho entre el adsorbente y los compuestos disueltos en el agua.

El carbón activo es el MG1050 12x40 de ChemiVall cuyas propiedades se pueden consultar en la Tabla 48 del apartado 2. Experimentos de adsorción de boro a escala laboratorio de los Anexos.

- **Balsa pulmón:**

Puesto que cada cierto tiempo se debe de detener la operación de adsorción con IGAC para el recambio de las columnas, es importante incorporar una balsa pulmón en este punto para que cuando se haga esta operación de recambio no se tengan que detener todas las operaciones anteriores. Se estima que

para realizar el recambio de columnas se necesitan 24 h. Agregando esta balsa se consigue almacenar el agua residual hasta que las columnas de adsorción con IGAC sean sustituidas y también sirve de almacenaje provisional en caso de avería.

- **Reactor de elevación de pH:**

Después de atravesar esta balsa pulmón, antes de conducir el agua residual al tratamiento de adsorción con carbón activo impregnado especializado en la eliminación de los compuestos de boro, es necesario realizar una elevación al *pH* del agua. Esto es debido a que en un medio básico los compuestos de boro tienden a ser iones borato monovalentes con mayor afinidad por la formación de complejos con el adsorbente impregnado. En el apartado 5.5.5.2 Adsorción de boro en carbón activo se puede encontrar más información relativa a esta característica. Se establece una elevación del *pH* hasta 9.

El reactivo seleccionado para ejecutar este aumento en el *pH* del agua es hidróxido de sodio ($Na(OH)$) con una concentración de 0,01 M y es preparado a partir de hidróxido de sodio comercial sólido. La preparación de este se realiza en un tanque aparte.

- **Columna de adsorción con IGAC:**

El agua residual extraída de las columnas de adsorción con lecho de GAC no impregnado, después de atravesar la balsa pulmón y el reactor de elevación de *pH*, es bombeada hasta la siguiente operación de adsorción, pero en este caso con GAC impregnado. Esta operación de la depuración es incluida en el tratamiento terciario para garantizar la eliminación de los compuestos de boro al menos hasta una concentración de 0,5 mg/L para poder utilizar el agua depurada en el sector agrario como agua de riego. Como ya se ha confirmado en el apartado 5.3.1. Regulación de la reutilización de aguas depuradas, el límite más restrictivo en compuestos de boro para reutilizar el agua es de 0,5 mg/L (para el caso de agua de riego), por lo que, si se garantiza alcanzar esta concentración en el tratamiento terciario, también se garantiza poder reutilizar el agua depurada no solo para cualquier tipo de riego, sino que también para otros posibles fines.

En el interior de estas tres columnas en paralelo el agua se distribuye de forma equivalente por toda la sección y fluye desde la parte superior del lecho adsorbente hasta la parte inferior, permitiendo un contacto estrecho entre el adsorbente impregnado y los compuestos de boro.

Las características del IGAC se encuentran descritas en la Tabla 48. Ya que es el mismo carbón activo de las anteriores columnas solo que impregnado de ácido cítrico, se conservan las mismas propiedades físicas.

- **Reactor de disminución de pH y tanque de cloración:**

Una vez ya ha transcurrido el agua residual a través de las columnas de adsorción rellenas de IGAC, se conduce el agua a un sistema de neutralización y de cloración automático.

En cuanto a la regulación del *pH*, la meta es bajar el parámetro a un valor de entre 7 y 8 para neutralizar en la medida de lo posible el agua. Esta regulación es necesaria para contrarrestar la elevación llevada a cabo en la anterior operación. El reactivo seleccionado para este trabajo es ácido clorhídrico (*HCl*) concentrado 0,01 *M* y es preparado a partir de ácido clorhídrico comercial al 37% en peso.

Por otro lado, para realizar la cloración, se instala un sistema de cloración automático para eliminar de forma sencilla, eficaz y barata la carga biológica causada por microorganismos patógenos, virus y bacterias. Mediante esta cloración con hipoclorito de sodio (*NaClO*) al 10% en peso se consigue disminuir todavía más la carga biológica del agua, cumpliendo las restricciones y permitiendo la reutilización de la corriente tratada en otros procesos.

- **Tanque final de almacenamiento:**

Finalmente, la última etapa del tratamiento se trata de un almacenamiento temporal del agua depurada. En este tanque se guarda un volumen de agua equivalente a un día de trabajo para poder llevar a cabo los análisis adecuados y disponer de agua para llevar a cabo la limpieza de los filtros de profundidad de arena.

9. Maquinaria e instalaciones

En este apartado se describen los equipos y espacios requeridos para materializar el proyecto. En el apartado 4. Catálogos comerciales de los Anexos se pueden consultar en profundidad las características de algunos de los equipos.

Para empezar, la disposición de los filtros, como se puede apreciar en la Figura 68, consiste en una carcasa cilíndrica con un diámetro interno de $0,62\text{ m}$ y una altura total de $2,49\text{ m}$. En la parte superior hay espacio para colocar un sistema de distribución de fluido homogéneo y en la parte inferior existe una cámara cuyo fin es conducir el agua filtrada a la tubería.

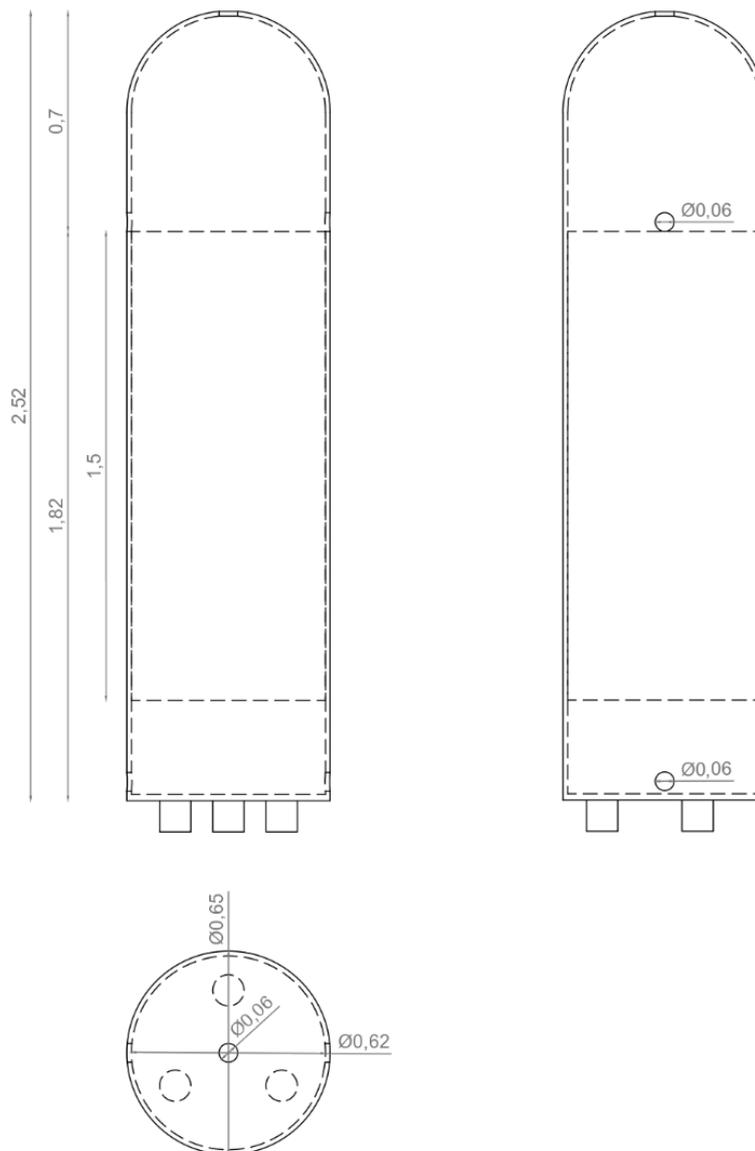


Figura 68: Plano constructivo de los filtros de profundidad de arena.

El equipo dispone de 6 posibles conexiones con una apertura un diámetro de $0,06\text{ m}$ cada una. Se ubican dos en la parte inferior, otras dos a nivel del lecho de arena, una en la parte inferior y otra en la

parte superior. La superior se utiliza para la introducción del agua a filtrar, una de las de nivel de arena se utiliza para la extracción del agua de lavado y las dos conexiones inferiores se utilizan una para la extracción del agua filtrada y la restante para la introducción del agua de lavado.

Como ya se ha mencionado anteriormente, se incorporan dos filtros para alternar las etapas de operación y las de limpieza. La disposición de la operación de filtración consiste en la representada en la Figura 67. Como se puede observar en dicho esquema, en las salidas de las bifurcaciones y en las salidas de los filtros existen válvulas de compuerta que permiten o restringen el paso en función de la etapa que esté llevándose a cabo. La apertura y cierre de las válvulas se controla mediante el nivel de agua residual sobre el lecho de arena y/o la diferencia de presión.

A modo de resumen, se presenta la Tabla 18 con las dimensiones y características generales de la operación de filtrado con arena.

Tabla 18: Dimensiones y características de la operación de filtrado.

Parámetro	Valor
Número de filtros	2
Altura útil del filtro, L_{Filtro} (m)	2,49
Altura total del filtro, L (m)	2,52
Diámetro interno, D_{in} (m)	0,62
Diámetro externo, D_{ex} (m)	0,65
Sección transversal interna del filtro, A (m ²)	0,302
Volumen de lecho, V (m ³)	0,453
Material	PVC
Espesor del lecho de arena, L_{Arena} (m)	1,5
Velocidad de filtrado, $v_{Filtrado}$ (m/h)	15
Caudal de agua, Q_v (m ³ /h)	4,4
Módulo de Reynolds, Re_m (—)	6,854
Perdida de presión provocada por el lecho, ΔP (Pa)	5846,141
Tiempo de contacto de lecho vacío, $EBCT$ (min)	15,78
Velocidad de lavado, v_{Lavado} (m/h)	14

Altura de la cámara baja, $L_{Cámara\ baja} (m)$	0,25
Espesor de la malla metálica, $L_{Malla\ metálica} (m)$	0,05

Es aconsejable realizar un estudio de la pérdida de presión con el tiempo y determinar cuando dar inicio al contralavado y, por tanto, el cambio de filtro en operación. obtener los tiempos óptimos de duración de la etapa de filtrado y la de limpieza una vez se realice la puesta en marcha la planta

Las columnas empleadas en las etapas de adsorción son cedidas por la misma empresa externa que se ocupa de suministrar el IGAC. Esta empresa también se encarga de administrar periódicamente el GAC necesario para llevar a cabo esta adsorción previa siguiendo la dinámica descrita en el apartado 6. Análisis de soluciones. La columna tiene las dimensiones indicadas en la Figura 69

El carbón activo suministrado es el mismo que se utiliza en la operación de adsorción con lecho de IGAC, pero sin impregnar, es decir, el MG1050 12x40 de ChemiVall cuyas propiedades se pueden consultar en la Tabla 48 del apartado 2. Experimentos de adsorción de boro a escala laboratorio de los Anexos.

A modo de resumen, se presenta la Tabla 19 con las dimensiones y características generales de esta operación de adsorción.

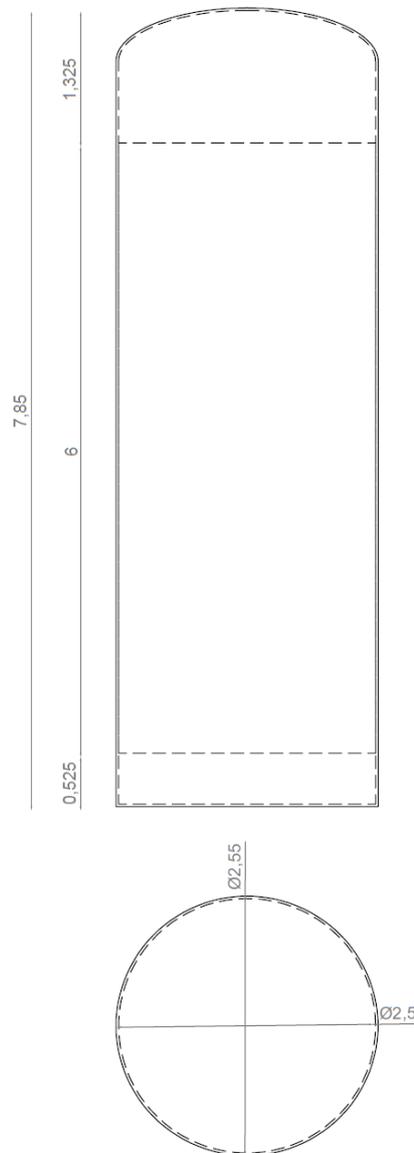


Figura 69: Dimensiones de la columna de adsorción proporcionada por la empresa contratada.

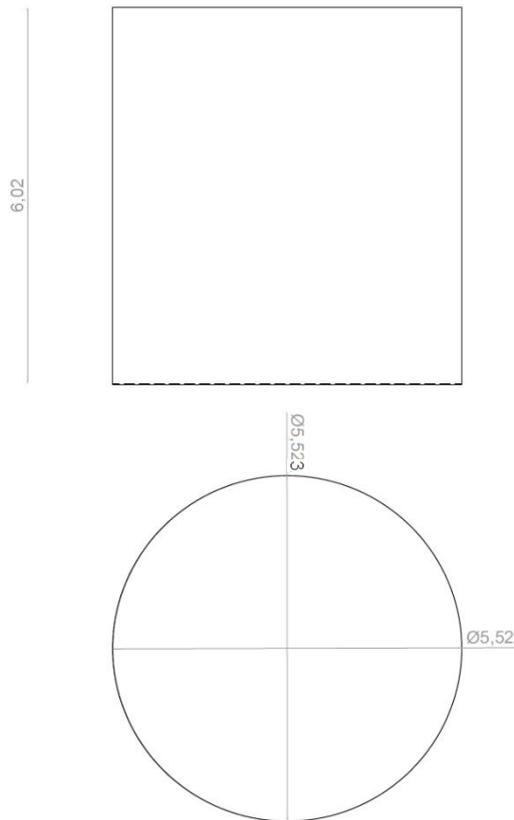
Tabla 19: Dimensiones y características de la operación de adsorción con GAC.

Parámetro	Valor
Número de columnas en paralelo	2
Altura útil de la columna, $L_{Columna}$ (m)	7,8
LUB supuesto, L_{LUB} (m)	0,6
LES supuesto, L_{LES} (m)	5,4
Altura total de la columna, L (m)	7,85
Diámetro interno, D_{in} (m)	2,5
Diámetro externo, D_{ex} (m)	2,55
Sección transversal interna del filtro, A (m ²)	4,909
Volumen de lecho, V (m ³)	29,452
Material	PP
Espesor del lecho de IGAC, L_{GACI} (m)	6
Velocidad de operación, $v_{Adsorción}$ (m/h)	0,7
Caudal de agua, Q_v (m ³ /h)	3,4361
Módulo de Reynolds, Re_m (-)	0,371
Tiempo de contacto de lecho vacío, $EBCT$ (h)	23,09
Tiempo de ruptura teórico, t_B (días)	355
Perdida de presión provocada por el lecho, ΔP (Pa)	338,317
Altura de la cámara baja, $L_{Cámara\ baja}$ (m)	0,45
Espesor de la malla metálica, $L_{Malla\ metálica}$ (m)	0,05

En la siguiente Tabla 20 se resumen las características de la balsa pulmón:

Tabla 20: Dimensiones y características de la balsa pulmón.

Parámetro	Valor
Altura, L (m)	6,02
Diámetro interno, D_{in} (m)	5,52
Diámetro externo, D_{ex} (m)	5,523
Sección transversal interna, A (m ²)	23,931
Volumen interno, V (m ³)	144,065
Material	Hormigón armado



En la siguiente Tabla 21 se resumen las características del reactor de elevación de pH :

Tabla 21: Dimensiones y características del reactor de elevación de pH .

Parámetro	Valor
Altura, L (m)	1,78
Diámetro interno, D_{in} (m)	1,28
Diámetro externo, D_{ex} (m)	1,286
Sección transversal interna, A (m ²)	1,287
Volumen interno, V (m ³)	2,29
Material	INOX AISI 316
Reactivo	$Na(OH)$ 0,01 M

Se estima una dosificación teórica de $4,1224 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3 \text{ Na(OH)(aq)}/h$, lo que supone el uso de $1,649 \text{ g Na(OH)}/h$. Para el control automático del pH se dispone de una sonda interior del tanque conectada a un control programable que compara el valor medido con las consignas prefijadas, de forma que se asegure en todo momento la correcta dosificación conforme a unos rangos establecidos.

La dosificación se lleva a cabo mediante una bomba dosificadora desde un tanque cerrado con agitación incorporada donde se almacena y prepara la base. En la Tabla 22 se resumen las dimensiones y características de este depósito de hidróxido de sodio. Se han de verter $0,4 \text{ g}$ de hidróxido de sodio por litro de agua de disoluciones para preparar la disolución. La bomba dosificadora que se emplea es la MEMDOS DX 4 de Lutz-JESCO, cuyas características se pueden observar en la Tabla 23.

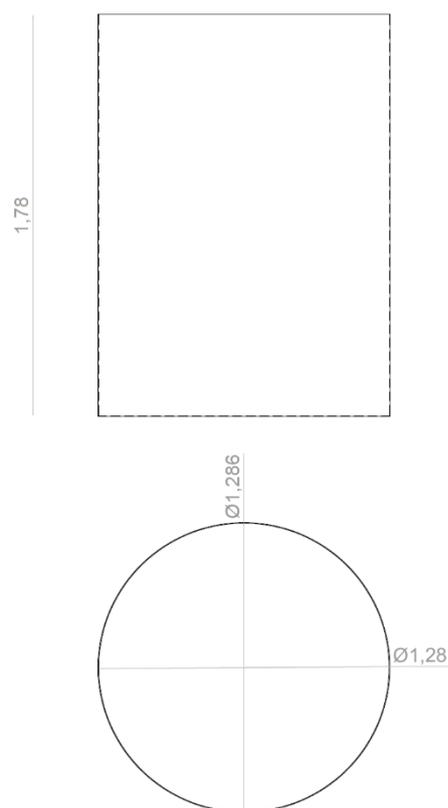


Tabla 22: Dimensiones y características del depósito de hidróxido de sodio.

Parámetro	Valor
Altura, L (m)	1,86
Diámetro interno, D_{in} (m)	1,36
Diámetro externo, D_{ex} (m)	1,363
Sección transversal interna, A (m ²)	1,453
Volumen interno, V (m ³)	2,702
Material	INOX AISI 316

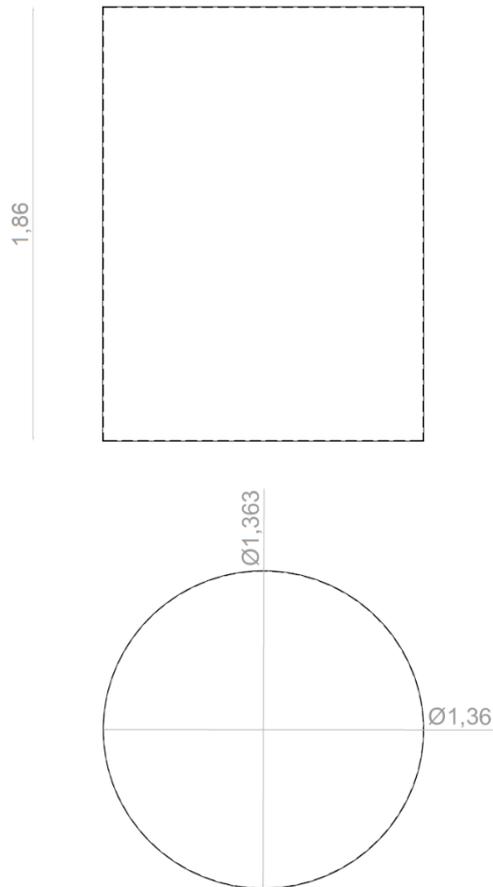


Tabla 23: Características de la bomba dosificadora MEMDOS DX 4 de Lutz-JESCO.

Parámetro	Valor
Fabricante	Lutz-JESCO
Modelo	MEMDOS DX 4
Capacidad de bombeo, Q_v (m^3/h)	0,0047
Potencia, P (kW)	0,1243
Cantidad de bombas instaladas	3+1R

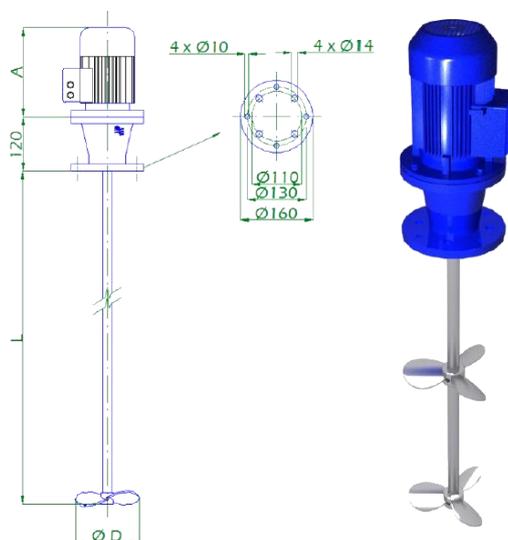


Capacidad	gph	1.2
Capacidad	l/h	4.7
Presión máxima	psig	
Capacidad/ciclo	ml	
Frecuencia del ciclo	SPM	32
Diámetro del diafragma	pulg	
Elevación de succión	pies H ₂ O	
Longitud del ciclo	in.	
Motor - 1-fase	Hp	
Temperatura ambiente máxima	°F	
Relación de transmisión		55:1

Para agilizar el mezclado y asegurar una buena distribución del reactivo se incorpora también un equipo de agitación. Este equipo es el VHD3-06 03 B 04 de FluidMix cuyas características se encuentran resumidas en la Tabla 24.

Tabla 24: Características del mezclador VHD3-06 03 B 04 de FluidMix.

Parámetro	Valor
Fabricante	FluidMix
Modelo	VHD3-06 03 B 04
Velocidad, ω (rpm)	750, 1000, 1500
Potencia, P (kW)	0,18 – 1,5
Tipo	Hélice marina tripala de 0,16 m de diámetro
Material	INOX AISI 316
Cantidad de agitadores instalados	3+1R



Modelo	Motor kW	rpm	A	D	L max.	kg	Vol. m ³
VHD3-06 03 B 04	1,1	1500	279	160	1500	21	1 – 2

Las columnas de adsorción con carbón activo impregnado consisten en una carcasa cilíndrica con un diámetro interno de 2,5 m y una altura útil de 7,8 m. En la parte superior hay espacio para colocar un sistema de distribución de fluido homogéneo y en la parte inferior existe una cámara cuyo fin es conducir el agua a la tubería hacia la siguiente operación. Se trata de las mismas columnas que en la anterior etapa de adsorción. En la Figura 69 se puede ver la disposición de una de estas columnas.

Las características del IGAC se encuentran descritas en la Tabla 48. Como ya se ha descrito anteriormente, una empresa externa dedicada al sector de las columnas de adsorción se encarga del mantenimiento y el recambio del lecho. Para más información acudir al punto 6. Análisis de soluciones.

A modo de resumen, se presenta la Tabla 25 con las dimensiones y características generales de esta operación de adsorción.

Tabla 25: Dimensiones y características de la operación de adsorción con IGAC.

Parámetro	Valor
Número de columnas en paralelo	3
Altura útil de la columna, $L_{Columna}$ (m)	7,8
LUB, L_{LUB} (m)	0,11025
LES, L_{LES} (m)	5,89
Altura total de la columna, L (m)	7,85
Diámetro interno, D_{in} (m)	2,5
Diámetro externo, D_{ex} (m)	2,55
Sección transversal interna del filtro, A (m ²)	4,909
Volumen de lecho, V (m ³)	29,452
Material	PP
Espesor del lecho de IGAC, L_{GACI} (m)	6
Velocidad de operación, $v_{Adsorción}$ (m/h)	0,3
Caudal de agua, Q_v (m ³ /h)	1,4726
Módulo de Reynolds, Re_m (-)	0,16
Tiempo de contacto de lecho vacío, $EBCT$ (h)	23,09
Tiempo de ruptura supuesto, t_B (días)	108

Perdida de presión provocada por el lecho, ΔP (Pa)	226,24
Altura de la cámara baja, $L_{\text{cámara baja}}$ (m)	0,45
Espesor de la malla metálica, $L_{\text{Malla metálica}}$ (m)	0,05

En la siguiente Tabla 26 se resumen las características del reactor de disminución de pH :

Tabla 26: Dimensiones y características del reactor de disminución de pH .

Parámetro	Valor
Altura, L (m)	1,685
Largo y ancho	1,188
Espesor, e (m)	0,003
Sección transversal interna, A (m^2)	1,397
Volumen interno, V (m^3)	2,35
Material	INOX AISI 316
Reactivo	HCl 0,01 M

Aunque no existe una dosis óptima fija de ácido debido a que la cantidad necesaria varía en función del pH del agua residual, si se puede establecer una relación con el volumen de hidróxido de sodio añadido previamente. Como ya se ha incidido anteriormente, el volumen de hidróxido de sodio necesario no se puede conocer con exactitud a priori, pues puede variar en función del tiempo debido a la diversidad de especies en el agua residual. Aun así, se estima una dosificación teórica de $4,261 \cdot 10^{-3} m^3 HCl(aq)/h$, lo que supone el uso de $0,058 mL HCl 50\%/min$.

El depósito de preparación de la disolución de ácido clorhídrico consiste en un tanque cerrado con agitación de iguales características y dimensiones que el descrito en la Tabla 22 para el hidróxido de sodio. Se han de verter $0,99 mL$ de ácido clorhídrico al 37% por litro de agua de disoluciones para preparar la disolución de ácido clorhídrico $0,01 M$.

Para el control automático del pH en el tanque se dispone de una sonda interior conectada a un control programable que compara el valor medido con las consignas prefijadas, de forma que se asegure en todo momento la correcta dosificación conforme a unos rangos establecidos.

Mediante rebose, el agua residual pasa del reactor de elevación de *pH* al tanque de cloración. En la Tabla 27 se resumen las características del tanque de cloración:

Tabla 27: Dimensiones y características del tanque de cloración.

Parámetro	Valor
Altura, <i>L</i> (m)	1,685
Largo y ancho	1,188
Espesor, <i>e</i> (m)	0,003
Sección transversal interna, <i>A</i> (m ²)	1,397
Volumen interno, <i>V</i> (m ³)	2,35
Material	INOX AISI 316
Reactivo	<i>NaOCl</i> 10% peso



La operación de cloración, como bien se describe en la Figura 70, funciona mediante un sistema automático de dosificación, medición y control de cloro libre mediante recirculación. Trabaja de forma que se fija como consigna un valor adecuado de cloro libre para que se mantenga estable en el tiempo y, mediante la medición al recircularse el agua y la actuación a través de la bomba dosificadora, se consigue controlar la cloración de forma efectiva.

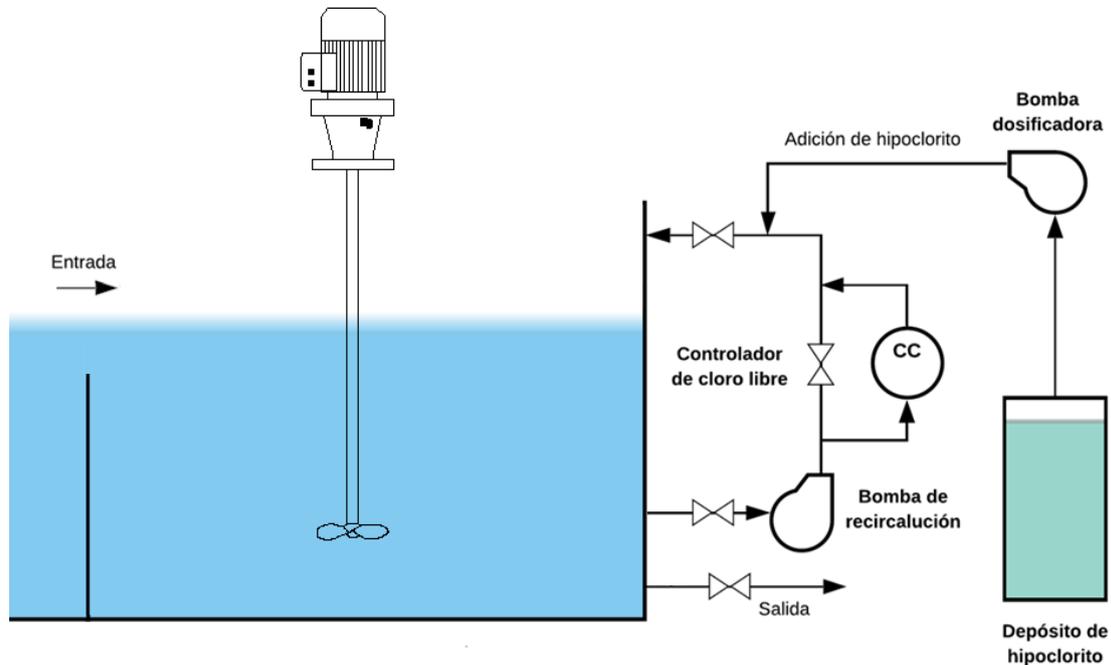


Figura 70: Esquema descriptivo del circuito automatizado de cloración.

Las dimensiones y características del depósito de almacenamiento de hipoclorito de sodio son las mismas a las descritas para los depósitos de los anteriores reactivos. Se pueden encontrar en la Tabla 22.

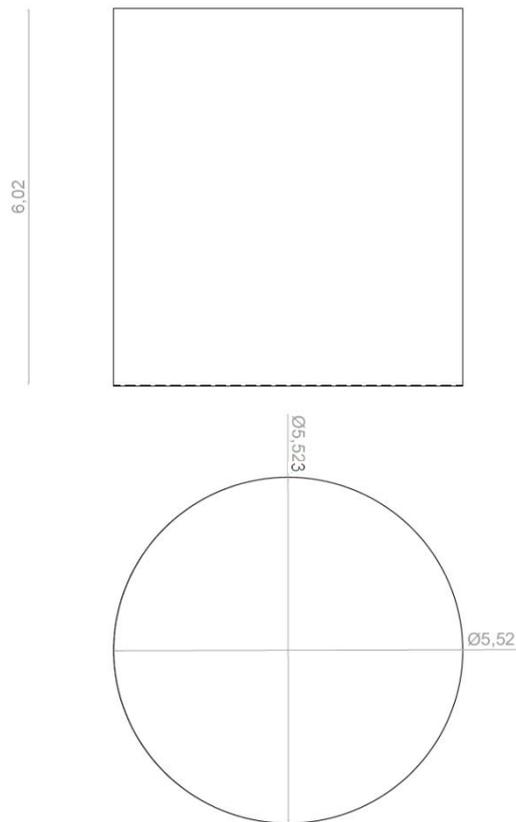
La dosificación de ácido clorhídrico y de hipoclorito de sodio se hace mediante una bomba dosificadora desde el tanque de almacenamiento respectivo. La bomba dosificadora que se emplea es igual a la utilizada en el reactor de elevación de pH , la MEMDOS DX 4 de Lutz-JESCO, cuyas características se pueden observar en la Tabla 23.

Para agilizar el mezclado y asegurar una buena distribución de ambos reactivos se incorporan también un equipo de agitación en cada uno de los reactores. Este equipo es el VHD3-06 03 B 04 de FluidMix cuyas características se encuentran resumidas en la anterior Tabla 24.

En la siguiente Tabla 28 se resumen también las características del tanque final de almacenamiento:

Tabla 28: Dimensiones y características del tanque final de almacenamiento.

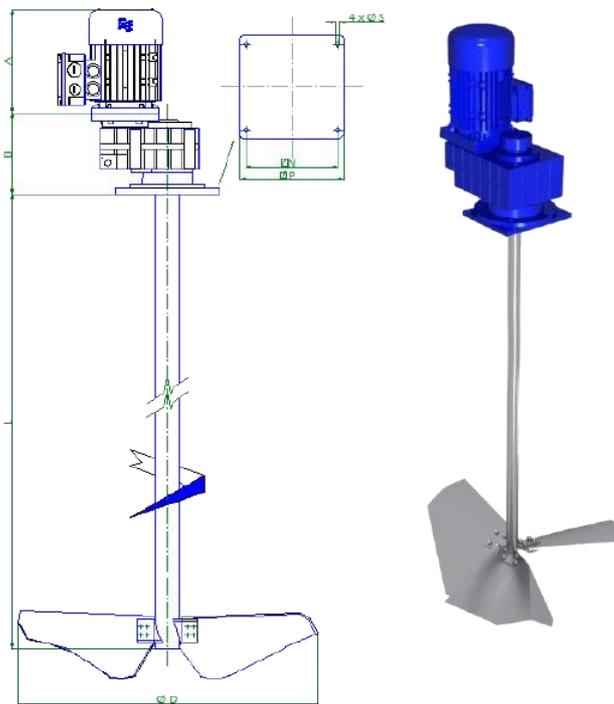
Parámetro	Valor
Altura, L (m)	6,02
Diámetro interno, D_{in} (m)	5,52
Diámetro externo, D_{ex} (m)	5,523
Sección transversal interna, A (m ²)	23,931
Volumen interno, V (m ³)	144,067
Material	Hormigón armado



Tanto en la balsa pulmón como en el tanque final de almacenamiento se incluye agitación para mantener la homogeneidad de las propiedades. Este equipo es el VPS3 de FluidMix cuyas características se encuentran resumidas en la Tabla 29.

Tabla 29: Características del agitador VPS3 de FluidMix.

Parámetro	Valor
Fabricante	FluidMix
Modelo	VPS3
Velocidad, ω (rpm)	30 – 150
Potencia, P (kW)	0,55 – 45
Tipo	3 palas axiales de perfil tipo S y diámetro de 2 m
Material	AISI 316
Cantidad de agitadores instalados	2+1R



Por último, se especifican las bombas centrífugas que se utilizan para impulsar los fluidos:

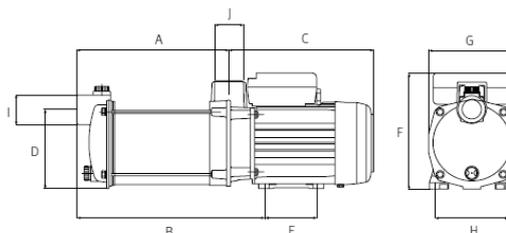
La primera de ellas es la Prisma 15 2 de Espa que se encarga de suministrar agua a las primeras operaciones del tratamiento terciario. Sus características se pueden observar en la Tabla 30:

Tabla 30: Características de la bomba Prisma 15 2 de Espa.

Parámetro	Valor
Modelo	Prisma 15 2
Proveedor	Espa
Tipo	Bomba centrífuga multietapa para el suministro de agua
Rango de bombeo, Q_v (m^3/h)	1,2 – 4,2
Rango de altura de bombeo, h (m)	9 – 31
Funcionamiento, w (rpm)	3450
Potencia, P (kW)	0,65
Cantidad	2+1R



Modelo	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	Kg
Prisma 15 2	163	213	202	110	74	162	121	102	1"	1"	9,2



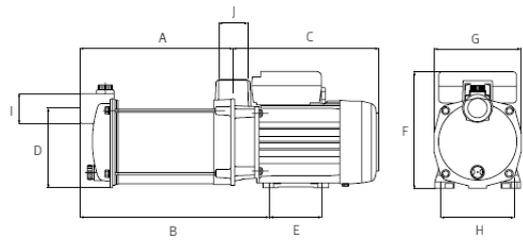
La segunda es la Prisma 15 l de Espa y se encarga de suministrar agua desde el reactor de elevación de *pH* hacia las columnas de adsorción con IGAC. Sus características se pueden observar en la Tabla 31:

Tabla 31: Características de la bomba Prisma 15 l de Espa.

Parámetro	Valor
Modelo	Prisma 15 l
Proveedor	Espa
Tipo	Bomba centrífuga multietapa para el suministro de agua
Rango de bombeo, Q_v (m^3/h)	1,2 – 4,2
Rango de altura de bombeo, h (m)	4 – 15
Funcionamiento, w (rpm)	3450
Potencia, P (kW)	0,4
Cantidad	1+1R



Modelo	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	Kg
Prisma 15 l	139	189	202	110	74	162	121	102	1"	1"	8,3



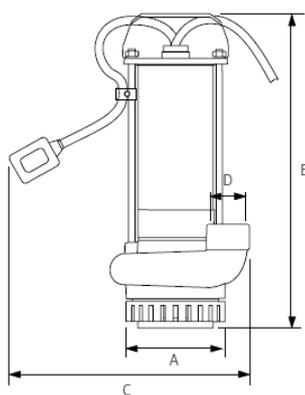
La tercera es la Drain 100 de Espa y se encarga de enviar agua desde el tanque de cloración hacia el tanque final de almacenamiento. Sus características se pueden observar en la Tabla 32:

Tabla 32: Características de la bomba Drain 100 de Espa.

Parámetro	Valor
Modelo	Drain 100
Proveedor	Espa
Tipo	Bomba sumergible para aguas residuales
Rango de bombeo, Q_v (m^3/h)	1,5 – 19,2
Rango de altura de bombeo, h (m)	9,2 – 1
Funcionamiento, w (rpm)	2900
Potencia, W (kW)	0,9
Cantidad	1+1R



Modelo	A	B	C	D	Kg
Drain 100	122	392	300	1 1/4"	10,5



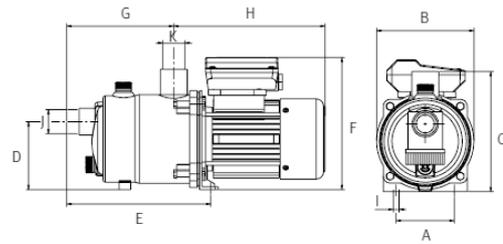
La quinta y última es la Tecno 5 3 de Espa y se encarga de suministrar agua al mecanismo de recirculación del tanque de cloración descrito en la anterior Figura 70. Sus características se pueden observar en la Tabla 33:

Tabla 33: Características de la bomba Tecno 5 3 de Espa.

Parámetro	Valor
Modelo	Tecno 5 3
Proveedor	Espa
Tipo	Bomba centrífuga multietapa para el suministro de agua
Rango de bombeo, Q_v (m^3/h)	0,3 – 2,2
Rango de altura de bombeo, h (m)	27 – 4
Funcionamiento, w (rpm)	2900
Potencia, P (kW)	0,35
Cantidad	1+1R



Modelo	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	Kg
Tecno 05 3	80	136	158	94	194	174	142	225	9	1"	1"	6,2



10. Definición de espacios

A partir del diagrama de flujo de la Figura 64 y la explicación del proceso realizada en el apartado 8. Descripción del proceso, se definen las zonas básicas que se dispondrán en la parcela. Estas zonas quedan descritas en la siguiente Tabla 34:

Tabla 34: Definición de espacios de la planta y sus aplicaciones correspondientes.

Espacio	Aplicación	Superficie, A (m^2)
1	Filtros de profundidad de arena	$2 \cdot 0,332$
2	Columnas de adsorción con GAC	$2 \cdot 5,107$
3	Balsa pulmón	23,983
4	Reactor de elevación de pH	2,299
5	Depósito de hidróxido de sodio 0,01 M	1,453
6	Columnas de adsorción con IGAC	$3 \cdot 5,107$
7	Reactor de disminución de pH	1,299
8	Depósito de ácido clorhídrico 0,01 M	1,453
9	Tanque de cloración	1,299
10	Depósito de hipoclorito de sodio 10% _p	1,453
11	Tanque final de almacenamiento	23,983

No se incluye almacén de reactivos, laboratorio, oficinas, aseos ni otros servicios dado que este tratamiento terciario se encuentra en las proximidades de la nave principal de la empresa productora de baldosas cerámicas.

11. Distribución de la planta

En este apartado se realiza la distribución en planta siguiendo el método SLP. Este método consiste en la división de los espacios básicos de una planta industrial determinando las interrelaciones entre cada uno de esos espacios. Una vez determinadas las relaciones, dándole uso a los diagramas se consiguen ubicar cada una de las zonas en la planta.

Para llevar a cabo esta distribución se tienen en cuenta el principio de integración de recursos (operarios, maquinaria y actividades) creando un compromiso entre cada una de las partes de la planta y el principio de mínima distancia recorrida. También, obviamente, se ordenan las áreas de trabajo según sea necesario para favorecer llevar a cabo el proceso sin mayores incidentes. Se hace uso de todas las dimensiones posibles del espacio teniendo en cuenta tanto la horizontalidad como la verticalidad de la parcela, satisfaciendo el confort y la seguridad tanto como es posible.

Tabla 35: Descripción de las relaciones en la tabla relacional para la distribución de la planta.

1	Filtros de profundidad de arena																			
2	Columnas de adsorción con GAC	1-2																		
3	Balsa pulmón	2-3	1-3																	
4	Reactor de elevación de pH	3-4	2-4	1-4																
5	Depósito de hidróxido de sodio 0,01 M	4-5	3-5	2-5	1-5															
6	Columnas de adsorción de GACI	5-6	4-6	3-6	2-6	1-6														
7	Reactor de disminución de pH	6-7	5-7	4-7	3-7	2-7	1-7													
8	Depósito de ácido clorhídrico 0,01 M	7-8	6-8	5-8	4-8	3-8	2-8	1-8												
9	Tanque de cloración	8-9	7-9	6-9	5-9	4-9	3-9	2-9	1-9											
10	Depósito de hipoclorito de sodio 10% p	9-10	8-10	7-10	6-10	5-10	4-10	3-10	2-10	1-10										
11	Tanque final de almacenamiento	10-11	9-11	8-11	7-11	6-11	5-11	4-11	3-11	2-11	1-11									

A continuación, se procede a determinar la importancia de proximidad entre las zonas definidas en la Tabla 34. Esta operación se realiza mediante una tabla relacional (Tabla 35) de forma que se vincula por parejas todas las actividades descritas y la importancia de que se encuentren próximas. Se han considerado las cuatro siguientes posibles relaciones de proximidad vinculando cada una de ellas con un color diferente:

Necesaria (S):

Es necesario que las zonas estén lo más próximas posible.

Importante (A):

Es propicio que las zonas se encuentren próximas.

• Sin importancia ():

La proximidad de las zonas relacionadas es irrelevante.

• Rechazable (X)

Es necesario que las zonas estén tan separadas como sea posible.

Por otro lado, la justificación de la relación seleccionada viene determinada por el siguiente código de números:

- | | |
|--------------------------------|----------------------------|
| 1) Necesidad del proceso. | 4) Economía de transporte. |
| 2) Facilidad de acceso. | 5) Molestias y peligros. |
| 3) Intercambio de información. | 6) Higiene y confort. |

A continuación, se presenta en la Tabla 36 la tabla relacional de actividades con la categoría y la justificación en cada casilla pertinente:

Tabla 36: Tabla relacional para la distribución de la planta.

1	S - 1									
2	S - 1									
3	S - 1									
4	S - 1									
5	A - 4	S - 1								
6	S - 1									
7	A - 4									
8	S - 1	S - 1								
9	A - 4									
10	S - 1	S - 1								
11										

Cabe señalar que, aunque no se ha indicado en la tabla, sería conveniente que los depósitos de reactivos se encuentren alejados entre ellos y, a ser posible, del resto de operaciones.

Seguidamente, se presenta el diagrama relacional en la Figura 71 siendo las líneas que unen cada actividad la representación de la relación establecida en la anterior tabla.

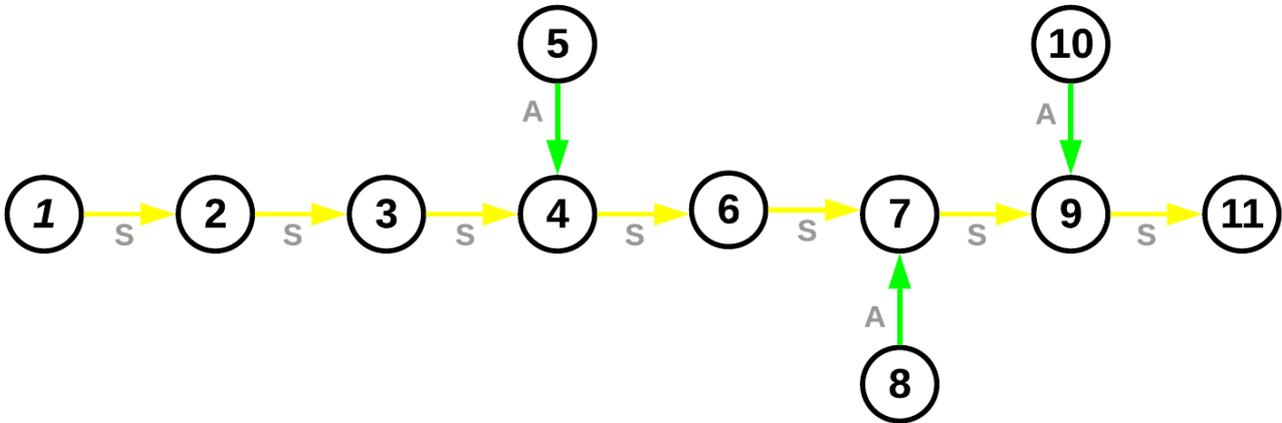


Figura 71: Diagrama relacional para la distribución en planta.

La distribución propuesta en el anterior diagrama y la información de los equipos y espacios detallada en el apartado 9. Maquinaria e instalaciones justifican la distribución en planta final confeccionada en el plano 3. Distribución en planta.

Teniendo en cuenta las superficies definidas en la Tabla 34 y los espacios que ocupan las conducciones, se determina la necesidad de una superficie mínima de $280,783 \text{ m}^2$ para llevar a cabo la actividad.

Para asegurar disponer de espacio suficiente para la circulación de personas y vehículos pequeños como carretillas elevadoras, se suman 3 m más de ancho y largo a esa superficie, siendo finalmente necesaria una parcela de $554,414 \text{ m}^2$.

12. Ubicación y emplazamiento de la actividad

El lugar seleccionado para la construcción de la planta viene condicionado por la proximidad a la empresa cerámica principal y, en concreto, a la planta de depuración ya existente. Dado que en la misma parcela en la que se encuentra el sistema de depuración fisicoquímico general y la nave de producción hay suficiente espacio disponible para ubicar el tratamiento terciario, no es necesario realizar una búsqueda comparativa entre parcelas de diferentes características.

A continuación, se describe un croquis del terreno en la Figura 72:

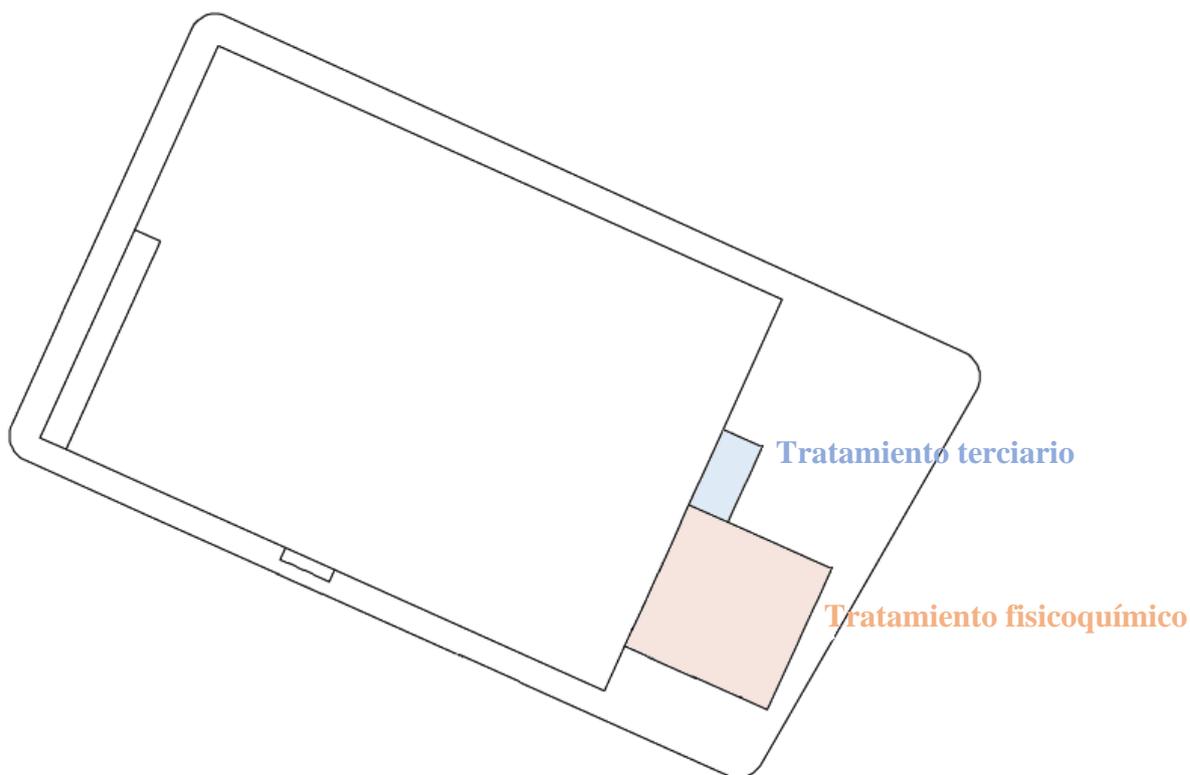


Figura 72: Parcela de emplazamiento del tratamiento terciario.

El espacio destinado al tratamiento terciario cuenta con una superficie de 598 m^2 , por lo que hay espacio suficiente para colocar la planta cuya superficie mínima se ha definido en $605,68 \text{ m}^2$ en el anterior apartado.

La ubicación física de la parcela está en las afueras del municipio de Segorbe en la provincia de Castellón. En concreto, la dirección es Pol. Ind. la Esperanza, C/ Comunidad de Galicia, 5, 12400 Segorbe, Castellón. En el plano 1. Ubicación de la planta se puede encontrar información más detallada de dónde se encuentra situada la planta.

13. Resumen del presupuesto de inversión

A continuación, en la Tabla 37 se resumen cada una de las partidas que componen el presupuesto de ejecución material (PEM), así como, los costes añadidos hasta la obtención del presupuesto de ejecución por contrata (PEC), siendo este último equivalente a la inversión.

Tabla 37: Resumen del presupuesto de inversión (P_0).

Elemento	Precio total
<i>PEM parcial obra civil (P_0)</i>	33.000,00 €
<i>PEM parcial instalaciones (P_I)</i>	18.000,00 €
<i>PEM parcial tanques y reactores (P_T)</i>	5.350,00 €
<i>PEM parcial conducciones y accesorios (P_C)</i>	8.237,71 €
<i>PEM parcial equipos electromecánicos e instrumentación (P_{Eq})</i>	24.755,00 €
<i>PEM parcial instalación eléctrica (P_E)</i>	10.840,00 €
<i>Presupuesto de ejecución material (PEM)</i>	100.182,71 €
<i>Gastos generales (13% del PEM)</i>	13.023,75 €
<i>Beneficio industrial (6% del PEM)</i>	6.010,96 €
<i>Presupuesto de ejecución por contrata parcial</i>	119.217,42 €
<i>IVA (21% del PEC parcial)</i>	25.035,66 €
<i>Presupuesto de ejecución por contrata (PEC)</i>	144.253,08 €

Como se ve reflejado en la anterior tabla el presupuesto de inversión (P_0), que es equivalente al presupuesto de ejecución por contrata (PEC), asciende a un valor de 144.253,08 €.

14. Presupuesto de explotación

En este apartado se determina el presupuesto de explotación, que no es más que los gastos totales para un año de operación. Para alcanzar este presupuesto es necesario discriminar los costes en directos e indirectos. A continuación, a lo largo de los dos siguientes subapartados se muestra cada uno de los elementos que componen estos gastos con sus respectivos costes. Una vez presentados todos los costes se procede al cálculo final del presupuesto de explotación mediante la suma de costes directos e indirectos:

$$P_E = C_D + C_I$$

14.1. Costes directos

Los costes directos (C_D) son aquellos que tienen relación directa con el producto y son proporcionales a la cantidad producida. Se componen de costes eléctricos (C_E), coste de reactivos (C_R) y costes de adsorción (C_A). A continuación, se determina la magnitud de cada uno de estos elementos.

$$C_D = C_E + C_R + C_A$$

14.1.1. Costes eléctricos

Para el cálculo de la electricidad consumida se debe tener en cuenta la potencia de cada uno de los equipos, el número de equipos instalados en la planta y el tiempo que se encuentran activos.

Se ha tenido en cuenta que los equipos trabajan 24 horas al día durante 330 días al año, por lo que el número total de horas de trabajo al año es 7920.

Para obtener la potencia total para cada uno de los equipos se utiliza la siguiente operación:

$$Potencia\ total\ (kW) = Potencia\ unitaria\ (kW) \cdot Cantidad$$

Y para determinar el consumo eléctrico se sigue la siguiente fórmula:

$$Consumo\ eléctrico\ (€/año) = Potencia\ total\ (kW) \cdot Precio\ (€/kW \cdot h) \cdot 7920\ h/año$$

Se ha tomado el precio de la energía eléctrica como un valor fijo equivalente a 0,13 €/kW · h.

En la Tabla 38 se pueden observar los resultados de estas operaciones.

Tabla 38: Costes eléctricos en un año de explotación (C_E).

Elemento	Cantidad	Potencia unitaria (kW)	Potencia total (kW)	Consumo eléctrico
<i>Bomba dosificadora Memdos DX 4 de Lutz Jesco</i>	3	0,127	0,381	392,27 €/año
<i>Mezclador VHD3-06 B 04 de FluidMix</i>	3	1,5	4,5	4.633,20 €/año
<i>Mezclador VPS3 de FluidMix</i>	2	3	6	6.177,60 €/año
<i>Bomba Prisma 15 2 de Espa</i>	2	0,64	1,28	1.317,89 €/año
<i>Bomba Prisma 15 1 de Espa</i>	1	0,4	0,4	411,84 €/año
<i>Bomba Drain 100 de Espa</i>	1	0,9	0,9	926,64 €/año
<i>Bomba Tecno 5 3 de Espa</i>	1	0,35	0,35	360,36 €/año
<i>Sistema de cloración automático</i>	1	2	2	2.059,20 €/año
<i>Sistema de acidificación automático</i>	2	2	4	4.118,40 €/año
Costes eléctricos (C_E)				20.397,40 €/año

Así pues, el coste eléctrico (C_E) de un año de trabajo es de 20.397,40 €.

14.1.2. Coste de reactivos

Para el cálculo del consumo de reactivos se debe tener en cuenta la cantidad utilizada de cada uno de ellos al año y el precio por unidad de volumen o de masa a la que se venden.

Se ha tenido en cuenta que los equipos trabajan 24 horas al día durante 330 días al año, por lo que el número total de horas de trabajo al año es 7920.

Para obtener la cantidad al año se ha utilizado la siguiente operación:

$$\text{Cantidad a la año (kg o L/año)} = \text{Cantidad (kg o L/h)} \cdot 7920 \text{ h/año}$$

Y para obtener el coste a año se ha utilizado esta operación:

$$\text{Coste a la año (€/año)} = \text{Cantidad al año (kg o L/año)} \cdot \text{Precio (€/kg o L)}$$

En la Tabla 39 se pueden observar los resultados de estas operaciones.

Tabla 39: Coste de reactivos en un año de explotación (C_R).

Elemento	Cantidad	Precio	Cantidad al año	Coste al año
$Na(OH)$ (s)	$1,649 \cdot 10^{-3} \text{ kg/h}$	1,32 €/kg	13,06 kg/año	17,24 €/año
HCl (aq) 37% _p	$4,199 \cdot 10^{-3} \text{ L/h}$	2,10 €/L	33,256 L/año	69,84 €/año
$NaClO$ (aq) 10% _p	$9,483 \cdot 10^{-3} \text{ L/h}$	0,87 €/L	75,105 L/año	65,34 €/año
Coste de reactivos (C_R)				152,42 €/año

En conclusión, el coste de reactivos es de 152,42 €.

14.1.3. Costes de adsorción

En este caso, los costes de adsorción (C_A) se refieren a los costes derivados de las operaciones de adsorción. Como ya se ha explicado en el apartado 6. Análisis de soluciones, una empresa externa se encarga de suministrar las columnas de lecho fijo y de su mantenimiento. Esto implica que la empresa transporta las columnas hasta la planta y una vez el lecho adsorbente de la columna alcanza la ruptura, la empresa se encarga de trasladar la columna inhabilitada y sustituirla por una nueva. Esta operación implica que la empresa externa se encarga de la instalación y el transporte de las columnas, así como la gestión del GAC y el IGAC que conforman su lecho interior.

Según las estimaciones realizadas, los tiempos de ruptura son de 355 y 108 días para el lecho de GAC y el de IGAC respectivamente. Tomando este dato y dividiéndolo entre las 7920 h de trabajo al año, se obtiene el número de recambios al año:

$$\text{Recambios al año} = \frac{7920 \text{ h}}{t_B \cdot 24 \text{ h}}$$

Según el presupuesto llevado a cabo por la empresa y los recambios estimados, el coste derivado de estas operaciones es el resumido en la siguiente Tabla 40:

Tabla 40: Costes de adsorción en un año de explotación (C_A).

Elemento	Cantidad	Precio unitario	Recambios al año	Coste al año
Columna de adsorción de lecho fijo rellena de GAC	2	24.080,35 €	1	24.080,35 €/año
Columna de adsorción de lecho fijo rellena de IGAC	3	61.081,10 €	3	183.243,30 €/año
Costes de adsorción (C_A)				207.323,65 €/año

Por lo tanto, el coste de adsorción (C_A) de un año de trabajo es de 207.323,65 €.

En conclusión, los costes directos (C_D) se resumen en la siguiente Tabla 41:

Tabla 41: Resumen de costes directos en un año de explotación (C_D).

Elemento	Precio total
Costes eléctricos (C_E)	20.397,40 €/año
Coste de reactivos (C_R)	152,42 €/año
Costes de adsorción (C_A)	207.323,65 €/año
Costes directos (C_D)	227.873,47 €/año

Finalmente, los costes directos (C_D) en un año son 227.873,47 €.

14.2. Costes indirectos

Los costes indirectos son aquellos gastos derivados de actividades que, sin ser proporcionales a la cantidad producida, son imprescindibles para la producción. En este caso, se han tenido en cuenta los sueldos de los empleados (C_S), la iluminación exterior (C_{II}) y el material para analizar el agua u otras tareas (C_M).

$$C_I = C_S + C_{II} + C_M$$

En esta planta únicamente se incorpora un jefe de planta puesto que no es necesaria la inclusión de más trabajadores ni operarios de otro tipo.

A continuación, en la Tabla 42 se detallan los costes indirectos.

Tabla 42: Costes indirectos en un año de explotación (C_I).

Elemento	Precio total
Salarios (C_S)	29.000,00 €/año
Coste de iluminación (C_{IL})	341,64 €/año
Costes de material (C_M)	4.000,00 €/año
Costes indirectos (C_I)	33.341,64 €/año

En conclusión, los costes indirectos (C_I) en un año son 33.341,64 €.

Así pues, una vez determinado los costes directos (C_D) e indirectos (C_I), se puede obtener el coste total de un año de explotación (P_E):

Tabla 43: Resumen del presupuesto de explotación al año (P_E).

Elemento	Precio total
Costes directos (C_D)	227.873,47 €/año
Costes indirectos (C_I)	33.341,64 €/año
Presupuesto de explotación (P_E)	261.215,11 €/año

El presupuesto de explotación resulta ser finalmente 261.215,11 €/año.

Dividiendo este valor entre el volumen total de agua tratada se puede obtener un valor de coste económico por unidad de volumen:

$$\frac{261.215,11 \text{ €}}{4,4 \text{ m}^3/\text{h} \cdot 24 \text{ h} \cdot 330 \text{ días}} = 7,50 \text{ €/m}^3$$

Siguiendo este mismo procedimiento también se puede obtener el mismo dato para la alternativa utilizada actualmente:

$$\frac{289.935,36 \text{ €}}{4,4 \text{ m}^3/\text{h} \cdot 24 \text{ h} \cdot 330 \text{ días}} = 8,32 \text{ €/m}^3$$

15. Estudio de viabilidad económica

En este apartado se realiza un estudio de viabilidad económica para la planta propuesta en este proyecto. El estudio toma como beneficios los ahorros conseguidos al emplear el tratamiento terciario estudiado, en lugar de continuar eliminando el agua residual mediante evaporación a través de su traslado en camiones cuba a una atomizadora a 39 km.

Se ha de tener en cuenta que, aunque en este estudio realmente no existen beneficios puesto que no se está comercializando un producto, sino que se ha tomado como beneficio el ahorro al utilizar la opción propuesta y no la actual. A pesar de que el concepto de “beneficio” no es del todo aplicable en este caso, se ha utilizado el concepto para facilitar la elaboración del estudio de viabilidad económica.

Con el fin de determinar los beneficios al utilizar el tratamiento propuesto respecto al método actual, se ha consultado el coste total derivado del transporte del agua a la planta atomizadora en 2019. Este coste fue de 289.935,36 €.

Para determinar los costes totales de explotación del tratamiento terciario se ha tomado el resultado obtenido anteriormente en el apartado 14. Presupuesto de explotación, mientras que para la definir la inversión inicial se ha utilizado el valor obtenido en el documento Presupuesto, cuyo resumen se puede encontrar en el apartado 13. Resumen del presupuesto de inversión. Se ha establecido un tiempo de amortización de 15 años para la inversión inicial. En resumen, los valores tomados y los cálculos realizados para llevar a cabo el estudio son los siguientes:

- **Presupuesto de inversión (P_I) = 144.253,08 €.**
- **Costes totales de la alternativa propuesta (C_{T1}) = 261.215,11 €/año.**

$$C_{T1n} = C_{T1} \cdot (1 + IPC)^{n-1}$$

- **Costes totales de la alternativa actual (C_{T2}) = 289.935,36 €/año.**

$$C_{T2n} = C_{T2} \cdot (1 + IPC)^{n-1}$$

- **Beneficio bruto (B_B).**

$$B_{Bn} = C_{T2n} - C_{T1n}$$

- **Beneficio neto (B_N).**

Se le descuenta el impuesto de sociedades (25%) al beneficio bruto.

$$B_{N_n} = B_{B_n} \cdot (1 - 0,25)$$

- **Amortización (A) de la inversión inicial para 15 años.**

$$A_n = \frac{P_I}{15} \cdot (1 + IPC)^{n-1}$$

- **Flujo de caja (FC).**

$$FC_n = B_{N_n} + A_n$$

A continuación, en la Tabla 44 se presenta el estudio de viabilidad económico.

Tabla 44: Estudio de viabilidad económica.

Año (n)	C _{T1}	C _{T2}	B _B	B _N	A	FC	$\frac{FC}{(1 + i_r)^n}$
1	261.215,11 €	289.935,36 €	28.720,25 €	21.540,19 €	9.616,87 €	31.157,06 €	30.629,82 €
2	264.401,93 €	293.472,57 €	29.070,64 €	21.802,98 €	9.734,20 €	31.537,18 €	30.478,87 €
3	270.892,70 €	300.676,98 €	29.784,29 €	22.338,22 €	9.852,96 €	32.191,17 €	30.584,47 €
4	280.928,82 €	311.816,56 €	30.887,75 €	23.165,81 €	9.973,16 €	33.138,97 €	30.952,18 €
5	294.891,07 €	327.313,95 €	32.422,88 €	24.317,16 €	10.094,83 €	34.411,99 €	31.597,31 €
6	313.323,73 €	347.773,25 €	34.449,52 €	25.837,14 €	10.217,99 €	36.055,13 €	32.545,83 €
7	336.970,04 €	374.019,44 €	37.049,40 €	27.787,05 €	10.342,65 €	38.129,70 €	33.836,06 €
8	366.822,21 €	407.153,81 €	40.331,61 €	30.248,71 €	10.468,83 €	40.717,54 €	35.521,06 €
9	404.190,67 €	448.630,89 €	44.440,22 €	33.330,17 €	10.596,55 €	43.926,72 €	37.672,22 €
10	450.799,35 €	500.364,13 €	49.564,78 €	37.173,59 €	10.725,83 €	47.899,41 €	40.384,13 €
11	508.916,59 €	564.871,28 €	55.954,69 €	41.966,02 €	10.856,68 €	52.822,70 €	43.781,35 €
12	581.535,55 €	645.474,61 €	63.939,05 €	47.954,29 €	10.989,13 €	58.943,42 €	48.027,72 €
13	672.623,86 €	746.577,95 €	73.954,09 €	55.465,57 €	11.123,20 €	66.588,77 €	53.339,09 €
14	787.471,05 €	874.052,43 €	86.581,38 €	64.936,04 €	11.258,91 €	76.194,94 €	60.001,05 €
15	933.175,35 €	1.035.776,72 €	102.601,37 €	76.951,03 €	11.396,26 €	88.347,29 €	68.393,37 €
							607.744,52€

Para hacer este estudio se han tomado los siguientes valores de estos índices económicos:

- Índice de Precios al Consumidor (*IPC*): 1,22%
- Interés nominal (i_n): 2,1%

Para comprobar si este estudio económico es favorable se hace uso de los siguientes tres indicadores de rentabilidad:

- **Valor Actual Neto (VAN):**

Corresponde al valor presente de los flujos de caja netos originados por una inversión. También se conoce como valor neto actual (*VNA*), valor actualizado neto o valor presente neto (*VPN*).

$$VAN = -P_I + \sum_{n=1}^N \frac{FC_n}{(1 + i_r)^n}$$

Un *VAN* positivo indica que la inversión produce excedentes. Si es negativo o 0 el proyecto no es rentable.

El *VAN* resultante de este estudio es de 463.491,44 €

- **Tasa Interna de Rentabilidad (TIR):**

La tasa interna de retorno, tasa interna de rentabilidad (*TIR*) o tasa de rentabilidad interna (*TRI*) de una inversión es la media geométrica de los rendimientos futuros esperados de dicha inversión. En términos simples, diversos autores la conceptualizan como la tasa de descuento con la que el valor actual neto (*VAN*) es igual a cero.

$$-P_I + \sum_{n=1}^N \frac{FC_n}{(1 + i_r)^n} = 0 \Big| i_r = TIR$$

Un *TIR* superior al interés nominal del dinero en el mercado de capitales es condición necesaria para realizar una inversión. Cuanto más alto es, más segura es la inversión.

En este caso el *TIR* es del 24,3726%. En la Figura 73 se puede ver la evolución del *VAN* en función de la tasa de descuento i_r .

- **Periodo de Retorno (PR):**

Es un criterio estático de valoración de inversiones que indica cuánto tiempo se tardará en recuperar la inversión inicial mediante los flujos de caja.

$$PR = \frac{P_I}{FC \text{ promedio anual}}$$

Es un indicador de la liquidez del proyecto, más que de su rentabilidad. Cuanto menor sea, más pronto se obtienen beneficios.

Para este proyecto el periodo de retorno es de 3,04 años.

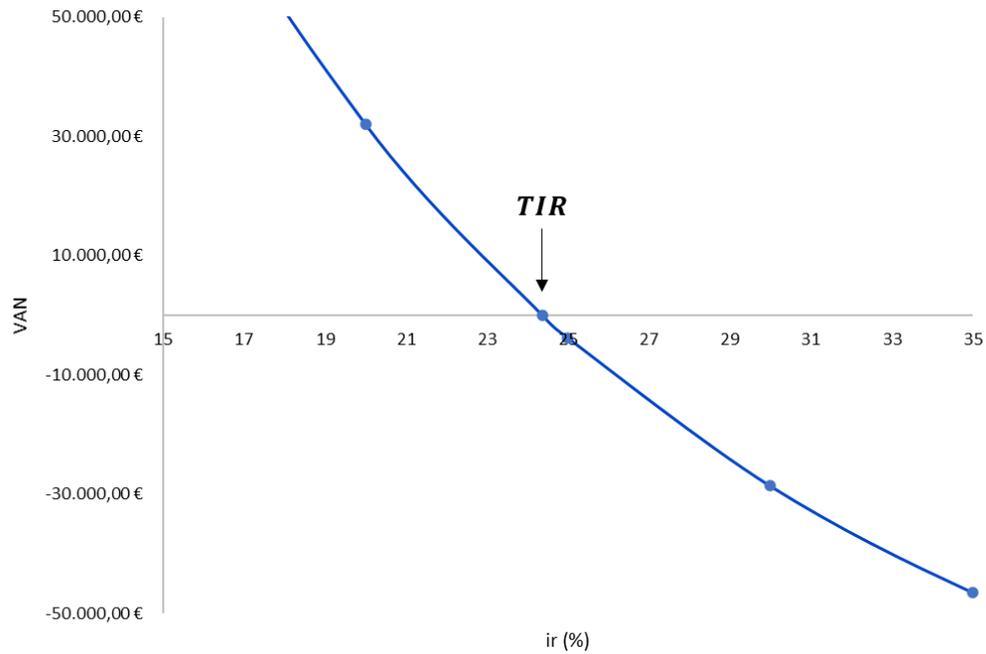


Figura 73: Gráfica realizada para la determinación del TIR.

16. Planificación de ejecución

Este apartado muestra los detalles de la planificación de ejecución para este proyecto. En la Tabla 45 se puede ver la planificación estimada de cada una de las actividades que se deben desempeñar para ejecutar el proyecto, mientras que en la Figura 74 se puede observar el respectivo diagrama de Gantt. En total la ejecución del proyecto se estima en 163 días.

Tabla 45: Planificación de las actividades de la ejecución del proyecto.

Tarea	Descripción	Duración	Inicio	Fin	Recursos
A	Burocracia	35 días	01-nov-2021	05-dic-2021	Personal interno
B	Obra civil de depósitos	26 días	05-dic-2021	31-dic-2021	Empresas subcontratadas y personal interno
C	Instalación eléctrica	12 días	01-ene-2022	12-ene-2022	Empresas subcontratadas y personal interno
D	Emplazamiento de instalaciones, reactores y depósitos	9 días	03-ene-2022	12-ene-2022	Empresas subcontratadas y personal interno
E	Instalación de la red de conducciones	21 días	12-ene-2022	02-feb-2022	Empresas subcontratadas
F	Instalación de equipos electromecánicos	15 días	02-feb-2022	17-feb-2022	Empresas subcontratadas y personal interno
G	Automatización y puesta a punto	30 días	17-feb-2022	19-mar-2022	Personal interno
H	Puesta en marcha	25 días	19-mar-2022	13-abr-2022	Personal interno

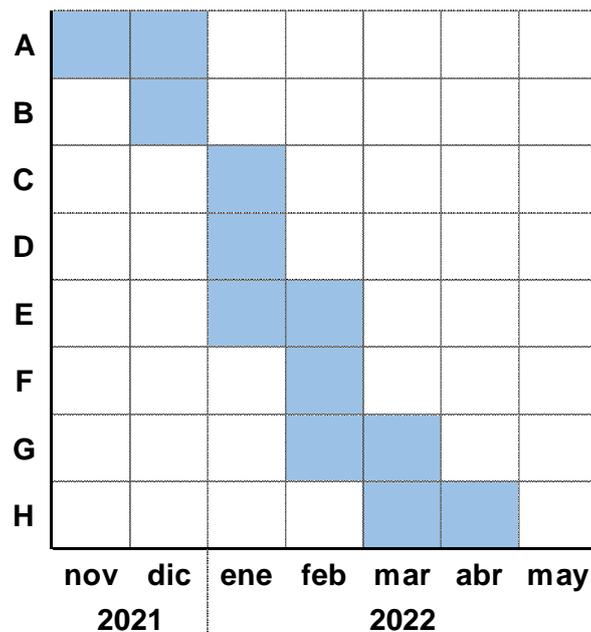


Figura 74: Diagrama de Gantt de la planificación de ejecución del proyecto

17. Normas y referencias aplicadas

- Real Decreto Legislativo 1/2001, de 20 de julio, por el que se aprueba el texto refundido de la Ley de Aguas.
- Real Decreto 849/1986, de 11 de abril, por el que se aprueba el Reglamento del Dominio Público Hidráulico, que desarrolla los títulos preliminar I, IV, V, VI y VII de la Ley 29/1985, de 2 de agosto, de Aguas.
- Directiva 91/271/CEE del Consejo, de 21 de mayo de 1991, sobre el tratamiento de las aguas residuales urbanas.
- Real Decreto 1620/2007, de 7 de diciembre, por el que se establece el régimen jurídico de la reutilización de las aguas depuradas.
- Real Decreto 656/2017, de 23 de junio, por el que se aprueba el Reglamento de Almacenamiento de Productos Químicos y sus Instrucciones Técnicas Complementarias MIE APQ 0 a 10.

Herramientas y programas utilizados:

- DeepL Traductor. Página de traducción online.
- Lucidchart. Página de creación de diagramas de flujo online.
- Autocad. Programa de dibujo técnico profesional
- SciDAVis. Programa de representación y resolución gráfica de integrales.
- Microsoft Word. Procesador de textos.
- Microsoft Excel. Hojas de cálculo y representación de datos.
- Gimp. Editor de imágenes.
- Photoshop. Editor de imágenes.
- Arquímedes CYPE: Elaboración de presupuestos y pliego de condiciones.

17.1. Bibliografía

- A. E. Rodrigues, M. D. (1989). *Adsorption: Science and Technology*. Londres: Naro Science Series E. Recuperado el 25 de octubre de 2020, de <https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=a4TpCAAQBAJ&oi=fnd&pg=PR11&dq=Adsorption:+Science+and+Technology+A.E.+Rodrigues,+M.+Douglas+LeVan,+Daniel+Tondeur&ots=AJCljEt9yK&sig=rNS->

LSKsCdNbScUmF68RrSC54bY#v=onepage&q=Adsorption%3A%20Science%20and%20Techno

- A. Al-Ghouti, M., & A. Da'ana, D. (2020). Guidelines for use and interpretation of adsorption isotherm models: A review. En *Journal of Hazardous Materials* (Vol. 393). doi:<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.122383>
- ASCER. (2021). *Informe del Impacto Socioeconómico y Fiscal del Sector de Azulejos y Pavimentos Cerámicos en España*. Resumen ejecutivo, Castellón. Recuperado el 12 de mayo de 2021, de <https://www.ascer.es/verDocumento.ashx?documentoId=19548&tipo=pdf>
- Bohórquez, H. (2018). *Tipos de Difusión en Medios Porosos*. Recuperado el 9 de noviembre de 2020, de Streemit: <https://steemit.com/spanish/@hugobohor/tipos-de-difusion-en-medios-porosos>
- C. H. Giles, T. H. MacEwan, S. N. Nakhwa, & D. Smith. (1960). *Studies in adsorption. Part XI. A system of classification of solution adsorption isotherms, and its use in diagnosis of adsorption mechanisms and in measurement of specific surface areas of solids*. The Royal College of Science and Technology, Chemical Technology Department. Glasgow: J. Chem. Soc. doi:<https://doi.org/10.1039/JR9600003973>
- Comisión Europea. (2011). *Mejores Técnicas Disponibles de referencia europea. Sector de la fabricación cerámica*. Documento BREF, Madrid. Recuperado el 12 de mayo de 2021, de https://prtr-es.es/Data/images/MTD_Ceramica_ES.pdf
- Díaz, A. (14 de diciembre de 2020). *Países líderes en la producción de boro a nivel mundial 2019*. Recuperado el 28 de febrero de 2021, de statista: <https://es.statista.com/estadisticas/635447/paises-lideres-en-la-produccion-de-boro-a-nivel-mundial/>
- Don W. Green, Robert H. Perry. (2007). Section 16: Adsorption and Ion Exchange. En *Perry's Chemical Engineers Handbook* (octava ed., Vol. 16). McGraw-Hill. Recuperado el 13 de diciembre de 2020
- Don W. Green, Robert H. Perry. (2007). Section 20: Alternative Separation Processes. En *Perry's Chemical Engineers Handbook* (octava ed., Vol. 16). McGraw-Hill. Recuperado el 13 de diciembre de 2020
- E. Treybal, R. (1997). Capítulo 11: Adsorción e Intercambio Iónico. En *Operaciones de Transferencia de Masa* (A. García Rodríguez, Trad., 2ª ed.). Rhode Island: McGraw-Hill.
- Emmanuel O. Aluyor y Olalekan A. M. Badmus. (2008). COD removal from industrial wastewater using activated carbon prepared from animal horns. *African Journal of Biotechnology*. Recuperado el 17 de mayo de 2021, de

https://www.researchgate.net/publication/242202195_COD_removal_from_industrial_waste_water_using_activated_carbon_prepared_from_animal_horns

- EPSAR. (2021). *Límites de vertido directo a cubas EDAR*. Valencia. Recuperado el 30 de enero de 2021, de <https://www.epsar.gva.es/sites/default/files/2018-05/120.pdf>
- G. Benveniste, C. G. (2011). Análisis de ciclo de vida y reglas de categoría de producto en la construcción. El caso de las baldosas cerámicas. *Informes De La Construcción*. doi:<https://doi.org/10.3989/ic.10.034>
- González Navarrete , B. D. (2017). *Desarrollo de carbón activado a partir de desechos agroindustriales con aplicación en adsorción de arsénico*. Trabajo de postgrado, Universidad de Chile, Santiago. Recuperado el 25 de enero de 2021, de <http://repositorio.uchile.cl/handle/2250/147405>
- J.E. Enrique, E. M. (2017). Reciclado de aguas residuales en la fabricación de baldosas cerámicas. *Boletín de la sociedad española de cerámica y vidrio*. doi:<http://dx.doi.org/10.3989/cyv.2000.v39.i1.883>
- Kochkodan, V., Bin Darwish, N., & Hilal, N. (2015). *The Chemistry of Boron in Water*. Elsevier. doi:<https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63454-2.00002-2>
- LJ. V. Rajakovíc, M. DJ, Ristíc. (1996). Sorption of boric acid and borax by activated carbon impregnated with various compounds. En *Carbon* (Vol. 34). Belgrado: Elsevier Science. doi:[https://doi.org/10.1016/0008-6223\(96\)00009-7](https://doi.org/10.1016/0008-6223(96)00009-7)
- (s.f.). *Manual del Carbón Activo*. Informe académico, Universidad de Sevilla, Master en ingeniería del agua, Sevilla. Recuperado el 4 de febrero de 2021, de <http://www.elaguapotable.com/Manual%20del%20carb%C3%B3n%20activo.pdf>
- Marsh, H., & Rodríguez-Reinoso, F. (2006). *Activated Carbon*. Elsevier Science. doi:<https://doi.org/10.1016/B978-0-08-044463-5.X5013-4>
- Mestenza Mateos, M. (2012). *Estudio de materiales adsorbentes para el tratamiento de aguas contaminadas con colorantes*. Tesis doctoral, Universidad Complutense de Madrid, Departamento de Ingeniería Química I, Madrid. Recuperado el 26 de noviembre de 2020, de <https://eprints.ucm.es/15692/>
- Metcalf & Eddie. (1995). Capítulo 6. Operaciones Físicas Unitarias. En *Ingeniería de Aguas Residuales* (J. Trillo Montsoriu, Trad., tercera ed.). McGraw-Hill.
- Metcalf & Eddie. (1995). Capítulo 7. Procesos Químicos Unitarios. En *Ingeniería de Aguas Residuales* (J. Trillo Montsoriu, Trad., tercera ed., Vol. primero). McGraw-Hill.

- Moliner Salvador, R. C. (2017). *Aplicaciones estratégicas de la Nanofiltración para el tratamiento de las aguas en la industria cerámica*. Doctorado en tecnologías Industriales i materiales, Universitat Jaume I, Castellón. doi:<http://dx.doi.org/10.6035/14031.2017.16958>
- Monfort Gimeno, E. (2013). *Tecnología del medio ambiente*. Castellón, España: Publicacions de la Universitat Jaume I.
- Orihuela Iranzo, E. (1981). *Adsorción de disoluciones acuosas: isothermas de adsorción y coeficientes de difusión*. Tesis doctoral, Universidad Complutense, Departamento de Ingeniería química, Madrid. Recuperado el 08 de Julio de 2020, de <https://eprints.ucm.es/52719/>
- Richmond Salazar, E. (2019). *Ejemplo de aplicación del método LUB*. Recuperado el 13 de mayo de 2021, de YouTube: https://www.youtube.com/watch?v=-xt5_MCSxUM
- Richmond Salazar, E. (2019). *Método LUB para lechos de Adsorción e Intercambio Iónico*. Recuperado el 13 de mayo de 2021, de YouTube: <https://www.youtube.com/watch?v=ys4Kfi0o1hU>
- Rodrigo Carbonell, M. (2003). *Operaciones básicas de flujo de fluidos*. Castellón: Publicacions de la Universitat Jaume I. Recuperado el 19 de mayo de 2021
- Rouquerol, F., Rouquerol, J., & Sing, K. (1999). *Adsorption by Powders and Porous Solids*. Londres, Reino Unido: Academic Press. doi:<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-598920-6.X5000-3>
- W. John Thomas and Barry Crittenden. (1998). *Adsorption Technology & Design*. Londres, Reino Unido: Butterworth-Heinemann. Recuperado el 20 de julio de 2020, de <https://www.sciencedirect.com/book/9780750619592/adsorption-technology-and-design>
- Wang, J., & Guo, X. (2020). Adsorption isotherm models: Classification, physical meaning, application and solving method. En *Chemosphere* (Vol. 258). doi:<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.127279>
- Wilke, C.R., Chang, P. (1955). *Correlation of diffusion coefficients in dilute solutions*. University of California. Berkeley: AIChE J. doi:<https://doi.org/10.1002/aic.690010222>

18. Conclusión

Finalmente, se ha conseguido dar solución al problema de gestión del agua residual evitando el sobrecoste causado por el transporte continuo de esta agua en camiones cuba. Así pues, se ha cumplido el objetivo general del proyecto estudiando, dimensionando y optimizando con éxito un tratamiento de depuración terciario integrado por operaciones de filtrado, adsorción, desinfección y regulación de la acidez. Es de especial importancia la etapa de adsorción con lecho de IGAC puesto que consigue extraer los compuestos de boro presentes en estas aguas residuales y permite la reutilización del agua para otros propósitos como el regadío. En la Figura 64 se puede observar el diagrama de flujo general del tratamiento terciario, mientras que en el plano 2. Diagrama de flujo se puede observar un esquema con los accidentes incluidos en la red de conducciones. También se puede observar la distribución de la planta en el plano 3. Distribución en planta.

Todos los objetivos específicos del proyecto también se han cumplido de forma satisfactoria sobre todo, gracias a los experimentos de adsorción desarrollados en el laboratorio, mediante los que se han podido obtener los datos de diseño alcanzando los rendimientos necesarios y optimizando la adsorción del boro.

Según los cálculos realizados en la parte final del apartado 14. Presupuesto de explotación, se ha demostrado que el tratamiento terciario propuesto es más rentable en vista de que tratar $1 m^3$ con la gestión actual supone un coste de 8,32 €, mientras que haciéndolo con la alternativa presentada, el coste es de 7,50 €. Se consigue ahorrar 0,82 € por cada m^3 tratado, lo que supone un gran ahorro cuando se trata de cantidades industriales. Sin ir más lejos, como se puede observar en la Tabla 44 del apartado 15. Estudio de viabilidad económica, el primer año de explotación ya se consigue el ahorro de 28.720,25 €. Esta rentabilidad también se ve reflejada en los índices de rentabilidad calculados en el mismo apartado. De hecho, según el periodo de retorno calculado, únicamente teniendo en cuenta el ahorro producido, se consigue recuperar la inversión inicial en tan solo 3,04 años.

Ya que se consigue alcanzar una depuración de alta calidad, se puede dar un nuevo uso al agua tratada utilizándola como agua de riego en el sector agrícola o, incluso como agua de aporte en los mismos procesos industriales de la planta cerámica si así fuera necesario. La primera opción mejora la calidad, la disponibilidad total de los recursos hídricos y la calidad de los ecosistemas asociados, mientras que la segunda contribuye a reducir la huella hídrica de las baldosas cerámicas esmaltadas producidas al reemplazar el agua de red por agua regenerada. La alternativa presentada presenta por lo tanto un mejor balance ambiental, integrándose en los criterios de las directrices europeas de economía circular y reducción de emisiones de dióxido de carbono al reducir el transporte del agua por carretera.

Otro aspecto a tener en cuenta es la tranquilidad que otorga este tratamiento terciario a la empresa cerámica en vista de que la gestión de las columnas de adsorción queda al cargo de una empresa externa subcontratada. Como la empresa externa da grandes facilidades encargándose del suministro del

equipo, la producción y gestión de los lechos de carbón activo y su instalación, la empresa cerámica puede despreocuparse moderadamente de las operaciones de adsorción. Teniendo en cuenta que la limpieza de los filtros de profundidad de arena y la adición de reactivos también se encuentra automatizada, no es necesario atender constantemente este tratamiento terciario, sino que más bien la tarea clave es la supervisión periódica de los resultados de la depuración mediante el análisis de la composición el agua tratada en el laboratorio de la empresa. En caso de avería, fallo o necesidad de recambio de columnas, no es necesario el paro completo del tratamiento puesto que se dispone de una balsa pulmón que concede un mayor tiempo de respuesta ante cualquier imprevisto.

Aunque la rentabilidad de la alternativa propuesta en este proyecto depende directamente de la distancia entre la planta de producción de baldosas y la planta de producción de polvo atomizado y existen casos en los que es más rentable la opción del transporte del agua, se ha demostrado que la inclusión de un tratamiento terciario de las características propuestas tiene una alta rentabilidad para empresas cerámicas moderadamente aisladas que no cuentan con operaciones de producción de polvo atomizado. También cabe señalar que, se abre un nuevo campo de investigación para optimizar el carbón activo granular impregnado y rentabilizar todavía más la operación, de forma que se pueda acelerar la velocidad de avance del agua residual y se requiera una menor cantidad de columnas en paralelo. Así pues, estos resultados también incentivan el emprendimiento, abriendo la posibilidad de crear nuevos negocios de gestión del agua residual.

En definitiva, mediante una inversión de 144.253,08 € y un tiempo de ejecución del proyecto estimado en 163 días, el tratamiento terciario expuesto consigue resolver de forma satisfactoria el problema planteado por la empresa, permitiendo ahorrar cada año alrededor del 10% de los costes derivados de la gestión actual, de forma que toda la inversión realizada se consigue recuperar en el tercer año de explotación tan solo teniendo en cuenta el ahorro económico

Anexos

ÍNDICE DE LOS ANEXOS:

1. Adjuntos de los antecedentes.....	203
2. Experimentos de adsorción de boro a escala laboratorio.....	206
3. Cálculos justificativos	210
3.1. Diseño de la operación de filtración con arena.....	210
3.2. Diseño de la operación de adsorción con GAC no impregnado.....	214
3.3. Diseño de la balsa pulmón.....	218
3.4. Diseño del reactor de elevación de pH	220
3.5. Diseño de la operación de adsorción con GAC impregnado.....	224
3.6. Diseño del reactor de disminución del pH	229
3.7. Diseño del reactor de cloración	233
3.8. Diseño del tanque final de almacenamiento	235
3.9. Diseño de las conducciones hidráulicas	237
4. Catálogos comerciales	273

1. Adjuntos de los antecedentes

A continuación, se presentan cierta información referenciada a lo largo de los antecedentes:

Tabla 46: Propiedades del GAC tipo K-81/B basado en cascara de coco.

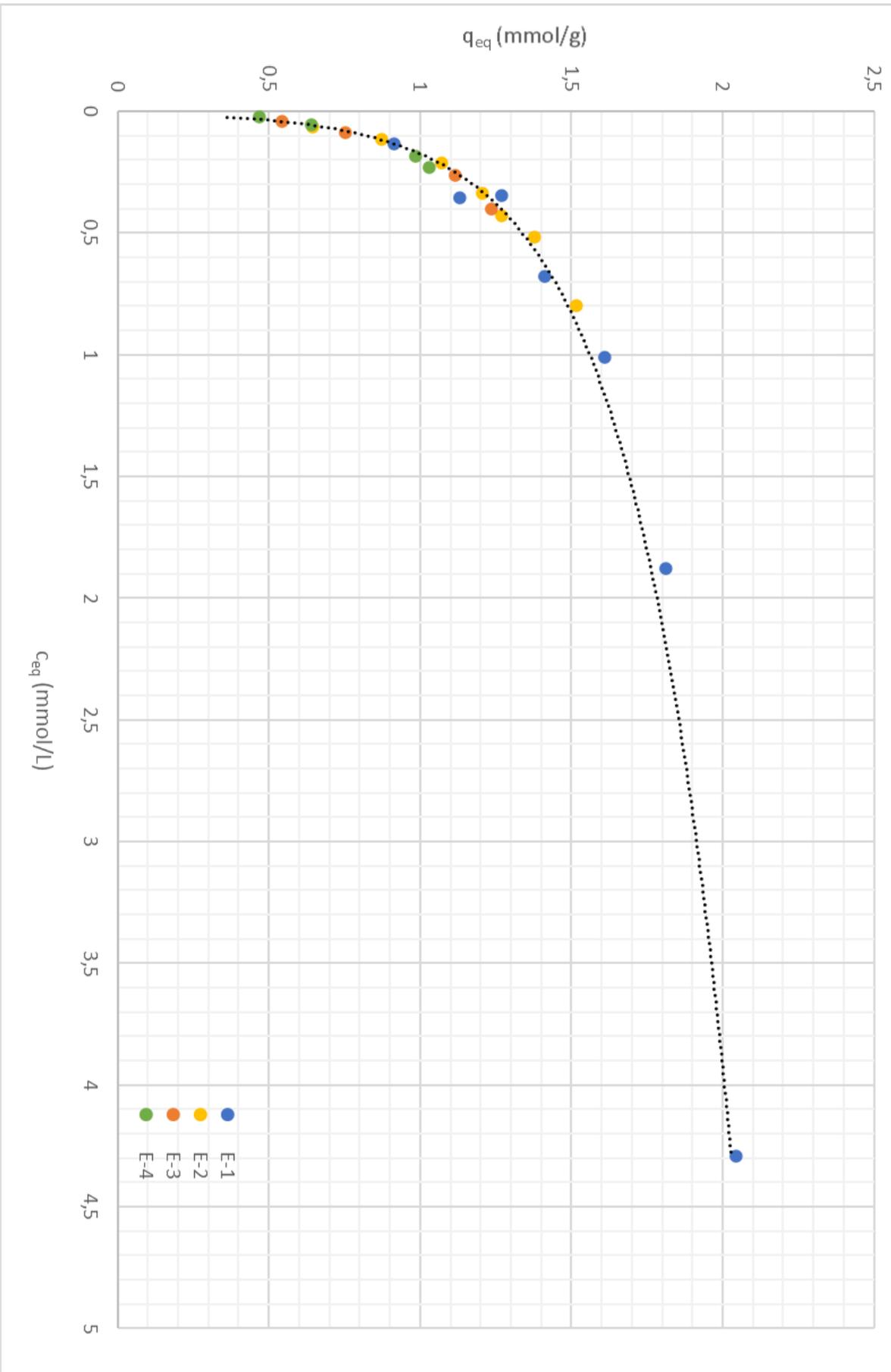
Parámetro	Valor
Cenizas (%)	5,5
Densidad del lecho, ρ_{Lecho} (kg/m^3)	440
Número de yodo (mg/g)	1200
Volumen de poros (cm^3/g)	0,9
Área superficial BET- N_2 (m^2/g)	1200
Diámetro medio, D_p (mm)	0,9
Análisis granulométrico (DIN 4188)	$> 1,6 \text{ mm}$ 4,5% $0,425 - 1,6 \text{ mm}$ 97,5% $< 0,425 \text{ mm}$ 0,5% $< 0,355 \text{ mm}$ 0,2%

- **Ejemplo de ensayo para determinar la isoterma de adsorción:**

Tabla 47: Ejemplo de ensayo para determinar la isoterma de adsorción.
[fenol en carbón activo AC – 35 – 5mm a 40°C]

Exp.	c_0 (mmol/L)	t (h)	m (g)	c_{eq} (mmol/L)	q_{eq} (mmol/g)
E-1	24,028	165	13,2115	0,68	1,413
			20,9221	0,136	0,913
			9,7719	1,877	1,813
			11,4298	1,01	1,611
			7,7149	4,291	2,045
			14,9003	0,348	1,271
			16,8578	0,355	1,13
E-2	9,76	161	83,8	0,118	0,873
			7,1289	0,215	1,071
			6,2483	0,337	1,206
			5,3619	0,517	1,379
			12,0311	0,065	0,645
			4,7248	0,798	1,517
			5,8727	0,428	1,271
E-3	9,618	159	14,0378	0,042	0,545
			10,107	0,087	0,754
			6,7116	0,264	1,115
			5,9567	0,4	1,238
E-4	9,168	160	11,3417	0,054	0,642
			15,5079	0,024	0,471
			7,296	0,187	0,985
			6,9407	0,229	1,03

Isoterma de adsorción de fenol en carbón activo AC-35-5mm a 40 °C



2. Experimentos de adsorción de boro a escala laboratorio

Con el fin de poder diseñar la operación de adsorción de boro con carbón activo granular impregnado de ácido cítrico se procedió a realizar varios experimentos en el laboratorio del ITC. El ITC es un instituto mixto entre la UJI de Castellón y AICE, entidad privada de carácter no lucrativo creada por iniciativa de la Generalitat Valenciana a través del IVACE en colaboración con las industrias del sector cerámico.

Estos ensayos se han realizado dentro del marco del proyecto “Sistema demostrador de producción de carbón activo a partir de residuos valencianos para aplicación en energía y medioambiente-CIRCULARCARBON” financiado por el IVACE. Proyecto que consiste en comprobar la posible depuración de boro, grasas y aceites contenidos en efluentes de agua residuales industriales.

El carbón activo utilizado fue el MG1050 12x40 de ChemiVall después de serle aplicado el procedimiento de impregnación con ácido cítrico. A continuación, en la Tabla 48 especifican las características de este adsorbente:

Tabla 48: Características del GAC MG1050 12x40 de ChemiVall.

Parámetro	Valor
Área superficial mínima, a (m^2/g)	1100
Diámetro de grano, D_p (mm)	1,68 – 0,42
Diámetro de poro, d_p (nm)	2 – 4
Humedad máxima al envasar (%)	5
Dureza mínima (%)	90
Densidad aparente, ρ_{ap} (kg/m^3)	565
Número de yodo (mg/g)	1050
Densidad drenada/contralavada (kg/m^3)	440 ± 20
Azul de metileno (g/kg)	210
Densidad aparente del lecho, ρ_{Lecho} (kg/m^3)	565
Porosidad total del lecho, ϵ_T (–)	0,45

Para poder realizar un escalado y diseñar la unidad con el método LUB a partir de valores experimentales de una planta a escala laboratorio o piloto es necesario cumplir los criterios expuestos en el apartado 5.5.6.3. Método LUB de la memoria. Uno de estos requisitos es mantener la similitud geométrica entre ambas escalas, laboratorio e industrial, por esta razón, debido a que el lecho ofrecido por la empresa externa mantiene una relación entre altura y diámetro de 2,4, el lecho de la columna del laboratorio debe cumplir también esa misma relación. En la Tabla 49 se incluyen las características de la columna en la que se realizaron los ensayos y en la Figura 76 se puede observar una imagen del montaje del dispositivo en el laboratorio.



Figura 75: Fotografía del carbón activo MG1050 12x40 de ChemiVall.

Tabla 49: Características de la columna de laboratorio.

Parámetro	Valor
Diámetro interno, D (cm)	6
Sección interna, A (cm ²)	28,27
Longitud del lecho, L (cm)	14,4
Volumen del lecho, V (dm ³)	407,2
Cantidad de adsorbente, m_b (kg)	0,23



Figura 76: Montaje del dispositivo experimental de laboratorio de la columna de adsorción.

La concentración de boro en la entrada se mantuvo en 10 mg/L en todos los ensayos, pues es la concentración promedio como ya se ha indicado en el apartado 7. Requisitos de diseño de la memoria.

Tras la obtención de varias curvas de ruptura para diferentes velocidades superficiales se determina que la mejor opción es mantener una velocidad baja de 0,3 m/h que, para este montaje, implica un caudal de 0,848 dm³/h y un EBCT de 28,8 min. Como ya se ha desarrollado en la teoría, una velocidad baja implica una proximidad mayor al concepto de adsorción ideal y, por lo tanto, una mejor aplicabilidad del método LUB.

Como se puede ver en la Figura 77, la curva de ruptura resultante es bastante favorable. El experimento fue llevado a cabo a una temperatura de 20 °C. El pH del agua se elevó hasta 9 para favorecer la retención del boro, pues, como ya se ha demostrado en el apartado de la memoria 5.5.5.2. Adsorción de boro en carbón activo, un pH elevado favorece una mayor formación de complejos entre el ácido cítrico y los compuestos de boro.

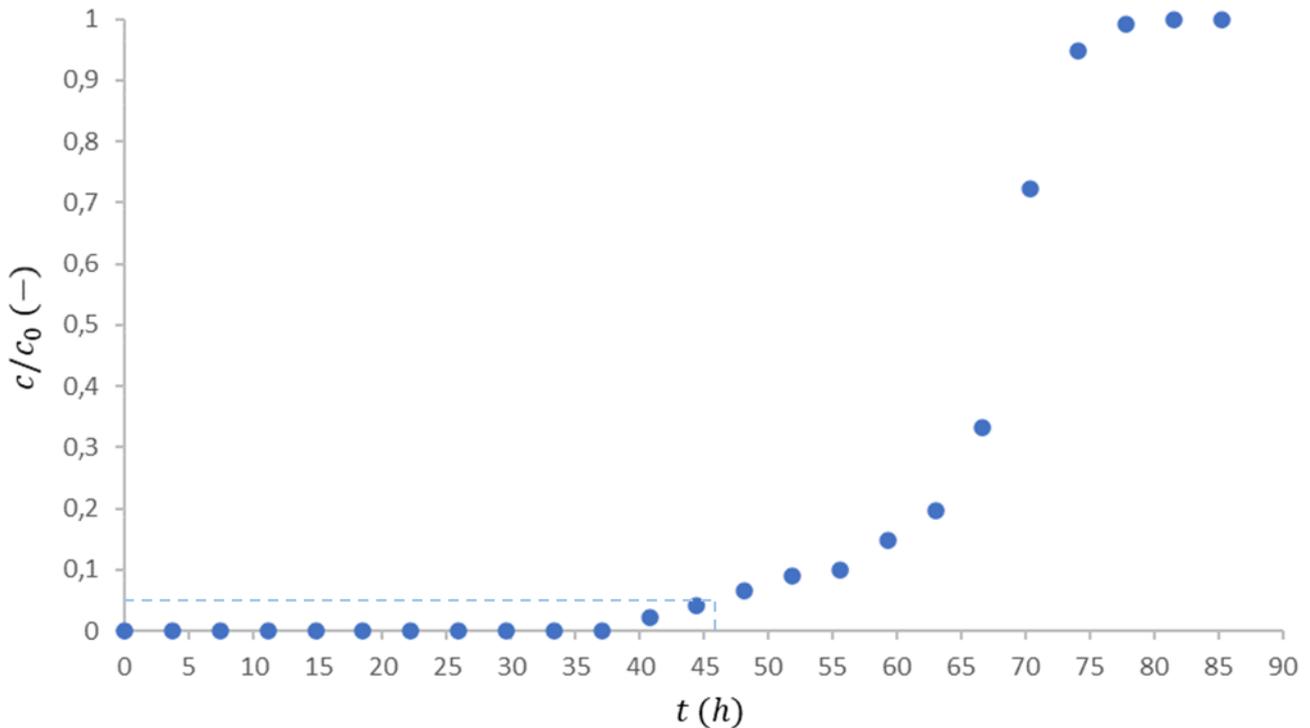


Figura 77: Curva de ruptura del boro en el ensayo a escala laboratorio.
($T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$, $L/D = 2,4$, $c_{\text{Boro } 0} = 10\text{ mg/l}$, $m_b = 0,23\text{ kg}$, $\text{pH} = 9,5$)

A continuación, se procede a aplicar el método LUB para determinar cuál es exactamente la cantidad de lecho utilizado y la adsorción alcanzada:

Cabe señalar que todas las condiciones para poder aplicar esta metodología han sido verificadas en el experimento de forma que no exista conflicto alguno con los criterios de aplicación del método.

Siguiendo lo descrito en el apartado teórico de la memoria relacionado con el método LUB, el primer paso es representar los valores de $1 - c/c_0$ (-) respecto al tiempo de ensayo. Con esta representación se puede conseguir resolver la integral del balance de materia a la columna (ecuación (4)) mediante un método de integración gráfico. Para la resolución gráfica de la integral se ha utilizado el programa SciDAVis. La representación se ha realizado en la Figura 78 y, seguidamente, se puede observar la resolución de la integral, que, según lo descrito en la teoría, no es más que la determinación del tiempo de ruptura para un comportamiento estrictamente ideal (t_s).

$$t_s = \int_{t_0=0}^{t=\infty} \left(1 - \frac{c_a}{c_{a0}}\right) \cdot dt = 66,113\text{ h}$$

Después de este cálculo, el siguiente paso es determinar con la curva de ruptura (Figura 77) el instante en el que ocurre la ruptura del lecho. Teniendo en cuenta que la ruptura ocurre cuando se sobrepasa la concentración de boro de $0,5\text{ mg/L}$ (puesto que es el límite exigido por el Real Decreto 1620/2007 para la reutilización de aguas depuradas en actividades agrícolas) y que la concentración a la entrada

es de 10 mg/L, se establece que el instante se corresponde con un valor de c/c_0 de 0,05. Mediante una interpolación lineal de los dos puntos de la curva más próximos a ese valor de c/c_0 se determina que el punto de ruptura es el seguidamente descrito en la Tabla 50.

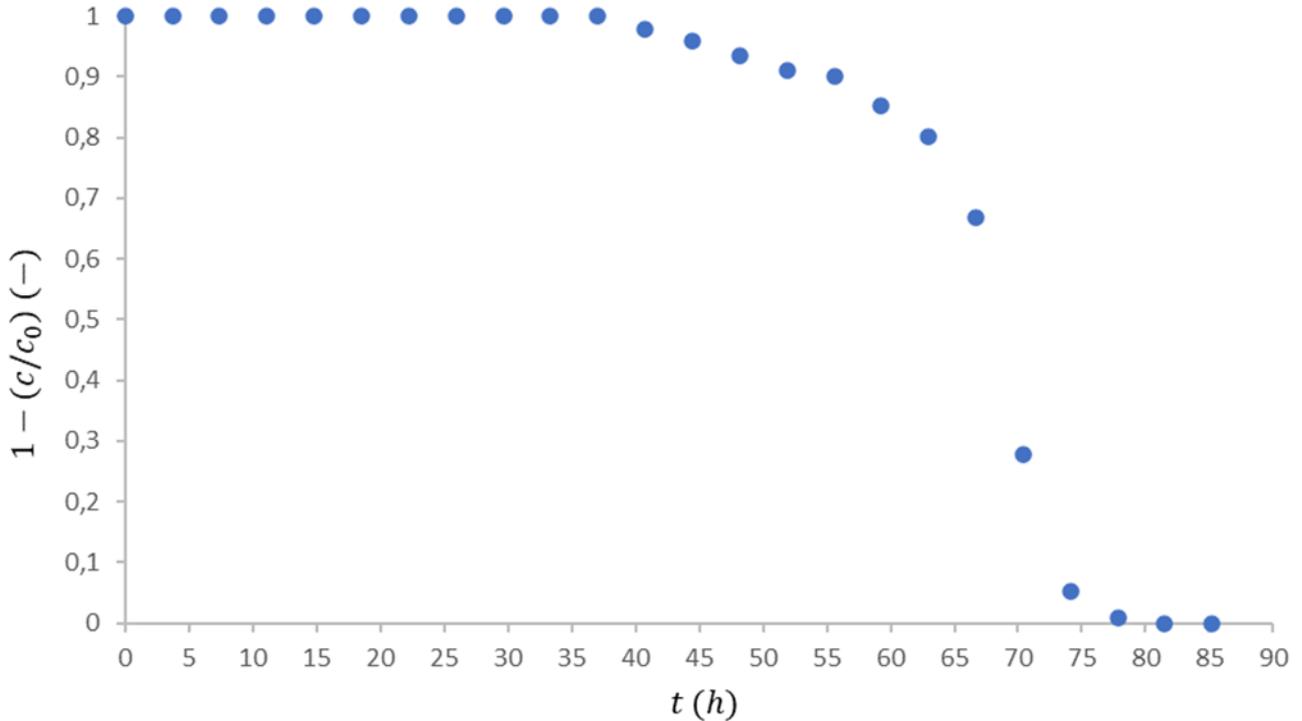


Figura 78: Representación de $1 - c/c_0$ (-) respecto al tiempo del ensayo en el laboratorio.

Tabla 50: Interpolación lineal realizada para obtener el punto de ruptura.

Punto	c/c_0 (-)	t (h)
P_{13}	0,0402	44,462
$P_{Ruptura}$	0,05	45,882
P_{14}	0,0657	48,167

$$t_B = 45,882 \text{ h}$$

Una vez determinados ambos instantes de ruptura, el ideal (t_S) y el real (t_B), ya se pueden calcular mediante las ecuaciones (17) y (18) las cantidades de sustancia adsorbida por unidad de masa de adsorbente, tanto para el planteamiento ideal ($q_{a_{eq}}$), como para el planteamiento real ($q_a|_{t=t_B}$):

$$q_{a_{eq}} = \frac{Q_{v0} \cdot c_{a0} \cdot t_s}{m_b} = \frac{0,848 \text{ L/h} \cdot 10 \cdot 10^{-6} \text{ kg/L} \cdot 66,113 \text{ h}}{0,23 \text{ kg}} = 0,0024378 \text{ kg boro/kg IGAC}$$

$$q_{a_{eq}} = 2,4378 \text{ g boro/kg IGAC}$$

$$q_a \Big|_{t=t_B} \approx \frac{Q_{v0} \cdot c_{a0} \cdot t_B}{m_b} = \frac{0,848 \text{ L/h} \cdot 10 \cdot 10^{-6} \text{ kg/L} \cdot 45,882 \text{ h}}{0,23 \text{ kg}} = 0,0016920 \text{ kg boro/kg GACI}$$

$$q_a \Big|_{t=t_B} = 1,692 \text{ g boro/kg IGAC}$$

Así, una vez obtenidos estos parámetros, se puede calcular con la ecuación (19) cuál es la fracción de capacidad utilizada (f_u):

$$f_u = \frac{q_a \Big|_{t=t_B}}{q_{a_{eq}}} = \frac{0,001692 \text{ kg boro/kg IGAC}}{0,00243779 \text{ kg boro/kg IGAC}} = 0,694$$

Como demuestra el anterior cálculo, se ha utilizado un 69,4% de adsorbente antes de la ruptura. Por último, se obtiene la longitud de lecho utilizada (L_{LES}) y la longitud de lecho no utilizada (L_{LUB}) con las ecuaciones (22) y (23):

$$L_{LES} = f_u \cdot L = 0,694 \cdot 14,4 \text{ cm} = 9,99 \text{ cm}$$

$$L_{LUB} = f_{nu} \cdot L = (1 - f_u) \cdot L = (1 - 0,694) \cdot 14,4 \text{ cm} = 4,41 \text{ cm}$$

3. Cálculos justificativos

Este apartado presenta las consideraciones tenidas en cuenta y los cálculos realizados para llevar a cabo el diseño del tratamiento terciario propuesto.

3.1. Diseño de la operación de filtración con arena

Para diseñar esta operación se debe seleccionar una velocidad de filtrado, o lo que es lo mismo, la velocidad superficial a la que circula el agua a través del lecho. La velocidad de filtrado depende de la consistencia de los flóculos y del tamaño medio de grano de lecho filtrante. Si los flóculos son de consistencia débil, las velocidades altas tienden a romperlos y a arrastrar gran parte a través del filtro. Velocidades de 4,8 a 19,2 m/h son típicas para no afectar la calidad del efluente del filtro.

El diseño se ha realizado con base en el caudal a tratar (Q_v) y la velocidad de filtrado ($v_{Filtrado}$) de diseño:

$$Q_v = 4,4 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$v_{\text{Filtrado}} = 15 \text{ m/h}$$

Mediante estos dos datos se obtiene la sección del filtro y, en consecuencia, el diámetro interior necesario. Como se está utilizando una visión macroscópica o, también llamada, de caja negra, no es necesario corregir los cálculos con parámetros de porosidad, tortuosidad o similares. Por esta razón, al calcular el área de la sección transversal del filtro no es necesario tener en cuenta que el filtro está relleno, sino que se puede aplicar el cálculo obviando el relleno.

$$A = \frac{Q_v}{v_{\text{Filtrado}}} = \frac{4,4 \text{ m}^3/\text{h}}{15 \text{ m/h}} = 0,293 \text{ m}^2$$

$$D = \sqrt{\frac{4 \cdot A}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,293 \text{ m}^2}{\pi}} = 0,61113 \text{ m} \approx 62 \text{ cm}$$

Dando uso a la ecuación (2) se calcula el módulo de Reynolds (Re_m) en el lecho poroso:

$$Re_m = \frac{\rho_f \cdot v \cdot D_p}{\mu \cdot (1 - \varepsilon)} = \frac{1000 \text{ kg/m}^3 \cdot 15 \text{ m/h} \cdot \frac{1 \text{ h}}{3600 \text{ s}} \cdot 0,987 \cdot 10^{-3} \text{ m}}{0,001 \text{ Pa} \cdot \text{s} \cdot (1 - 0,4)} = 6,854$$

Tomando como referencia lo descrito en la bibliografía (Metcalf & Eddie, 1995), se dispone de la siguiente información de la Tabla 51 respecto a los filtros de profundidad:

Tabla 51: Características físicas habituales de un filtro de profundidad de arena.
(Metcalf & Eddie, 1995)

Funcionamiento del filtro	Tipo de filtro	Tipo de lecho	Medio	Profundidad típica del medio (cm)	Dirección del flujo de fluido	Lavado a contracorriente	Caudal de circulación a través del filtro
Semicon-tinuo	Lecho profundo	Medio único	Arena o antracita	120 – 180	Descendente	Discontinuo	Constante o variable

Con base en estos datos de la Tabla 51 se establece una profundidad del lecho de arena de 150 cm:

$$L_{\text{Arena}} = 150 \text{ cm} = 1,5 \text{ m}$$

A continuación, se procede a determinar la pérdida de carga mínima (ΔF_l) en los filtros aplicando ecuación de Ergun (14) que describe pérdida de carga provocada en el lecho. Tal y como se describe en la Figura 79, la entrada del agua ocurre en el punto 1, mientras que el punto 2 representa su salida.

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{150 \cdot \mu \cdot (1 - \varepsilon_T)^2}{D_p^2 \cdot \varepsilon_T^3} \cdot v + \frac{1,75 \cdot \rho_f \cdot (1 - \varepsilon_T)}{D_p \cdot \varepsilon_T^3} \cdot v^2$$

$$\Delta P = \frac{150 \cdot L_{Arena} \cdot \mu \cdot (1 - \varepsilon_T)^2}{D_p^2 \cdot \varepsilon_T^3} \cdot v + \frac{1,75 \cdot L_{Arena} \cdot \rho \cdot (1 - \varepsilon_T)}{D_p \cdot \varepsilon_T^3} \cdot v^2$$

Tomando los valores para el caso de los filtros aquí diseñados:

$$\Delta P = \frac{150 \cdot 1,5 \text{ m} \cdot 0,001 \text{ Pa} \cdot \text{s} \cdot (1 - 0,4)^2}{(0,987 \cdot 10^{-3} \text{ m})^2 \cdot 0,4^3} \cdot \frac{15}{3600} \text{ m/s} + \frac{1,75 \cdot 1,5 \text{ m} \cdot 1000 \text{ kg/m}^3 \cdot (1 - 0,4)}{0,987 \cdot 10^{-3} \text{ m} \cdot 0,4^3} \cdot \left(\frac{15}{3600} \text{ m/s}\right)^2$$

$$\Delta P = 5846,141 \text{ Pa}$$

Dividiendo por la densidad del fluido (ρ) se obtiene la pérdida de carga mínima del filtro:

$$\Delta F_l = \frac{\Delta P}{\rho} = \frac{5846,141 \text{ Pa}}{1000 \text{ kg/m}^3} = 5,846 \text{ J/kg}$$

La pérdida de carga mínima del lecho filtrante en la etapa de filtrado queda determinada como $5,846 \text{ J/kg}$. Para tener en cuenta las pérdidas de energía adicionales provocadas por las incrustaciones, el ensuciamiento y el distribuidor de flujo, se multiplica el resultado por un factor de 1,4:

$$\Delta F = 5,846 \text{ J/kg} \cdot 1,4 = 8,184 \text{ J/kg}$$

En conclusión, la pérdida de carga queda determinada en un valor de $8,184 \text{ J/kg}$.

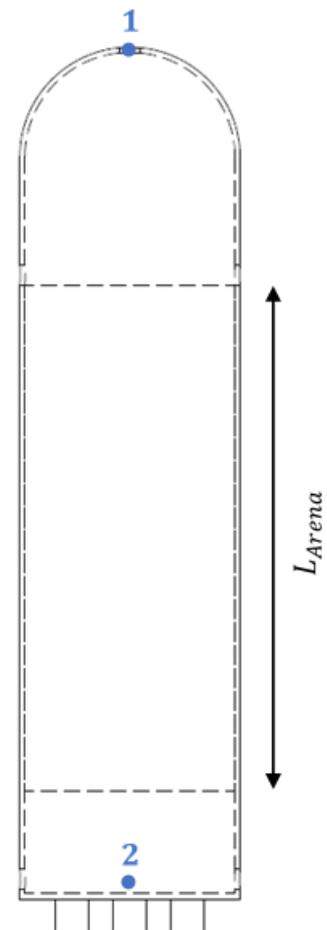


Figura 79: BEM al filtro de profundidad de arena (etapa de filtrado).

El caudal de agua de lavado ($Q_{v_{Lavado}}$) se determina a partir de la velocidad de limpieza efectiva, cuya magnitud es 14 m/h :

$$Q_{v_{Lavado}} = v_{Lavado} \cdot A = 14 \text{ m/h} \cdot \frac{\pi}{4} \cdot 0,62^2 \text{ m}^2 = 4,227 \text{ m}^3/\text{h} \approx 4,23 \text{ m}^3/\text{h}$$

La pérdida de carga mínima (ΔF_l) en los filtros para la etapa de lavado se puede determinar de forma idéntica al cálculo realizado anteriormente para la etapa de filtrado. En la Figura 80 se representa la entrada y la salida del agua mediante los puntos 1 y 2 respectivamente.

Tomando los valores para el caso de los filtros aquí diseñados:

$$\Delta P = \frac{150 \cdot 1,5 \text{ m} \cdot 0,001 \text{ Pa} \cdot \text{s} \cdot (1 - 0,4)^2}{(0,987 \cdot 10^{-3} \text{ m})^2 \cdot 0,4^3} \cdot \frac{14}{3600} \text{ m/s} + \frac{1,75 \cdot 1,5 \text{ m} \cdot 1000 \text{ kg/m}^3 \cdot (1 - 0,4)}{0,987 \cdot 10^{-3} \text{ m} \cdot 0,4^3} \cdot \left(\frac{14}{3600} \text{ m/s}\right)^2$$

$$\Delta P = 5429,464 \text{ Pa}$$

Dividiendo por la densidad del fluido (ρ) se obtiene la pérdida de carga mínima del filtro:

$$\Delta F_l = \frac{\Delta P}{\rho} = \frac{5429,464 \text{ Pa}}{1000 \text{ kg/m}^3} = 5,429 \text{ J/kg}$$

De esta forma, queda determinada la pérdida de carga mínima del lecho filtrante en la etapa de lavado como $5,846 \text{ J/kg}$. Para tener en cuenta las pérdidas de energía adicionales provocadas por las incrustaciones, el ensuciamiento y el distribuidor de flujo, se multiplica el resultado por un factor de 1,4:

$$\Delta F = 5,846 \text{ J/kg} \cdot 1,4 = 7,601 \text{ J/kg}$$

En conclusión, la pérdida de carga determinada es $7,601 \text{ J/kg}$.

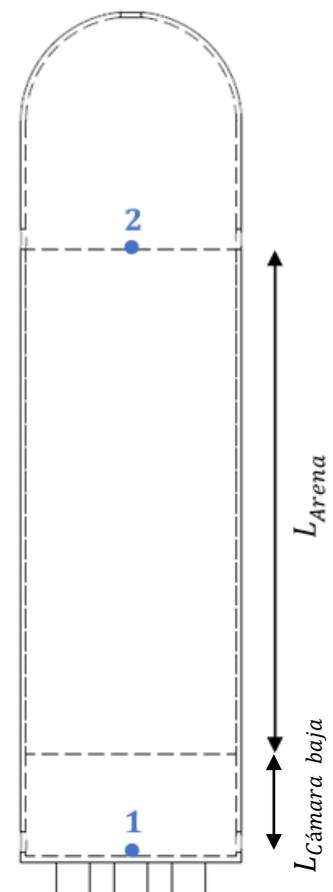


Figura 80: BEM al filtro de profundidad de arena (etapa de lavado).

3.2. Diseño de la operación de adsorción con GAC no impregnado

En este caso, al no disponer de datos experimentales para llevar a cabo el diseño, se toma un valor de longitud no utilizada de lecho (L_{LUB}) equivalente a un 10% de la longitud del lecho, es decir:

$$L_{LUB} = 0,1 \cdot L_{GAC} = 0,1 \cdot 6 \text{ m} = 0,6 \text{ m}$$

Teniendo en cuenta que la adsorción de los compuestos que conforman el parámetro de la DQO es habitualmente de mayor valor que la adsorción de los compuestos de boro observada en los experimentos con IGAC realizados y que en el caso de la columna de IGAC el L_{LUB} determinado es de 11,025 cm, se puede decir que tomar un L_{LUB} de 0,6 m es en realidad sobredimensionar la longitud de lecho no utilizado. En conclusión, el L_{LUB} real debe ser menor a 0,6 m, pero al no disponer de datos, tomar un valor sobredimensionado es una buena opción para determinar los valores en este diseño. Cuando la planta esté totalmente acabada se recomienda elaborar la curva de ruptura de estas columnas para saber cuál es exactamente el valor de L_{LUB} y el tiempo de ruptura.

Según datos bibliográficos (Emmanuel O. Aluyor y Olalekan A. M. Badmus, 2008) y la experiencia de la empresa externa con adsorciones de este tipo a velocidades de 0,7 m/h y dimensiones de columna similares, se establece el siguiente valor de cantidad de sustancia adsorbida por unidad de masa del adsorbente ($q_{a_{eq}}$):

$$q_{a_{eq}} = 50 \text{ g DQO/kg GAC}$$

Así, definiendo estos parámetros de diseño:

- Caudal de alimentación, $Q_{v_0} = 4,4 \text{ m}^3/\text{h}$.
- Concentración de la alimentación, $c_{a_0} = 40 \text{ mg DQO/L}$.
- Área de la sección del lecho, $A = 4,91 \text{ m}^2$.
- Altura del lecho, $L_{GAC} = 6 \text{ m}$.

Y siguiendo los tres pasos descritos en el apartado referente al Método LUB de la memoria se puede determinar la dimensión útil del lecho y el tiempo de ruptura de este. Seguidamente se describen los cálculos realizados en cada uno de estos pasos:

Primero, mediante la ecuación (24), se determinaría la longitud del lecho no utilizado en la columna industrial, pero como se ha supuesto una longitud no procede el cálculo.

En segundo lugar, tomando la ecuación (25), se determina cual es el volumen útil del lecho para la adsorción (V_{LES}):

$$V_{LES} = L \cdot A - V_{LUB} = 6 \text{ m} \cdot \frac{\pi}{4} \cdot 2,5^2 \text{ m}^2 - 0,6 \text{ m} \cdot \frac{\pi}{4} \cdot 2,5^2 \text{ m}^2 = 26,507 \text{ m}^3$$

Por último, se aplica la ecuación (26) con el fin de calcular el tiempo de ruptura (t_B):

$$t_B = \frac{\rho_{Lecho} \cdot q_{aeq} \cdot V_{LES}}{Q_{vColumna\ GAC} \cdot c_{a0}} = \frac{565 \text{ kg GACI/m}^3 \cdot 50 \text{ g DQO/kg GAC} \cdot 26,507 \text{ m}^3}{Q_{vColumna\ GAC} \cdot 40 \text{ g DQO/m}^3}$$

Para ello, se determina cual es el caudal a través de la columna ($Q_{vColumna\ GAC}$):

$$Q_{vColumna\ GAC} = v_{Columna\ GAC} \cdot A_{Columna\ GAC} = 0,7 \text{ m/h} \cdot \frac{\pi}{4} \cdot 2,5^2 \text{ m}^2 = 3,4361 \text{ m}^3/\text{h}$$

Ya que todo el cálculo se basa en una extrapolación de los resultados experimentales y en estos no se ha tenido en cuenta en ningún momento que la columna realmente está rellena y la sección transversal es menor a la de la columna vacía, no es necesario ajustar los resultados con valores de porosidad u otros parámetros relacionados con las oquedades. Es decir, como se está utilizando una visión macroscópica o, también llamada, de caja negra, para ambas escalas no es necesario corregir los datos experimentales ni los de diseño con parámetros de porosidad, tortuosidad o similares. Por esta razón, al calcular el caudal que transcurre a través de la columna de adsorción no es necesario tener en cuenta que la columna está rellena, sino que se puede aplicar el cálculo obviando el relleno y tomando la sección transversal de la columna como el valor del área por la que circula el fluido.

Finalmente:

$$t_B = \frac{565 \text{ kg GACI/m}^3 \cdot 50 \text{ g DQO/kg GAC} \cdot 26,507 \text{ m}^3}{3,4361 \text{ m}^3/\text{h} \cdot 40 \text{ g DQO/m}^3} = 5448,202 \text{ h} \approx 227 \text{ días}$$

Por lo tanto, el tiempo de ruptura se estima en 227 días.

Teniendo en cuenta que el caudal de la columna de adsorción, como ya se ha calculado anteriormente, es de $3,4361 \text{ m}^3/\text{h}$ y se quiere tratar un caudal de $4,4 \text{ m}^3/\text{h}$, es evidente que se deben utilizar varias columnas en paralelo de forma que el agua residual se divida en ramas y pueda ser depurada en su totalidad. El número de columnas en paralelo (n) se calcula a continuación:

$$n = \frac{Q_v}{Q_{v_{Columna\ GAC}}} = \frac{4,4\ m^3/h}{3,4361\ m^3/h} = 1,28 \approx 2$$

Por lo tanto, se deben de utilizar 2 columnas de GAC no impregnado para llevar a cabo esta etapa del tratamiento.

Debido a que se desea que ambas columnas trabajen en las mismas condiciones y las conducciones hidráulicas a cada una de estas dos columnas tienen un diámetro y organización idénticas, se recalcula todo el diseño para que coincida con un caudal de trabajo igual entre ambas columnas, es decir, el caudal de diseño en cada columna será como máximo:

$$Q_{v_{Columna\ GAC}} = \frac{Q_v}{n} = \frac{4,4\ m^3/h}{2} = 2,2\ m^3/h$$

Por tanto, la velocidad de circulación en el interior de la columna es de:

$$v_{Columna\ GAC} = \frac{Q_{v_{Columna\ GAC}}}{A_{Columna\ GAC}} = \frac{2,2\ m^3/h}{\frac{\pi}{4} \cdot 2,5^2\ m^2} = 0,4482\ m/h$$

Cabe señalar que, al variar el valor del caudal, pero no las dimensiones de la columna, la velocidad del agua residual en el interior de la columna varía y, en consecuencia, la cantidad de sustancia adsorbida por unidad de masa de adsorbente. Aun siendo evidente este problema, se decide seguir utilizando el mismo valor de cantidad de sustancia adsorbida por unidad de masa de adsorbente ($q_{a_{eq}}$) puesto que tan solo es un valor de referencia para poder realizar el diseño teórico. Como ya se ha mencionado anteriormente, es de vital importancia obtener la curva de ruptura de estas columnas una vez la planta esté acabada de forma que se conozca cuáles son exactamente las condiciones en las que se está trabajando y poder obtener los valores de reales de la L_{LUB} y el tiempo de ruptura.

Así pues, el tiempo de ruptura teórico queda en:

$$t_B = \frac{565\ kg\ GAC/m^3 \cdot 50\ g\ DQO/kg\ GAC \cdot 26,507\ m^3}{2,2\ m^3/h \cdot 40\ g\ DQO/m^3} = 8509,35\ h \approx 355\ días$$

Dando uso a la ecuación (2) se calcula el módulo de Reynolds (Re_m) en el lecho poroso:

$$Re_m = \frac{\rho_f \cdot v \cdot D_p}{\mu \cdot (1 - \varepsilon)} = \frac{1000\ kg/m^3 \cdot 0,7\ m/h \cdot \frac{1\ h}{3600\ s} \cdot 1,05 \cdot 10^{-3}\ m}{0,001\ Pa \cdot s \cdot (1 - 0,45)} = 0,371$$

A continuación, se procede a determinar la pérdida de carga mínima (ΔF) en estas columnas aplicando la ecuación de Ergun (14) que describe pérdida de carga provocada en el lecho. Tal y como se describe en la Figura 81, el punto 1 representa la entrada del agua por la parte superior, mientras que el punto 2 representa la salida por el fondo.

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{150 \cdot \mu \cdot (1 - \varepsilon_T)^2}{D_p^2 \cdot \varepsilon_T^3} \cdot v + \frac{1,75 \cdot \rho_f \cdot (1 - \varepsilon_T)}{D_p \cdot \varepsilon_T^3} \cdot v^2$$

$$\Delta P = \frac{150 \cdot L_{GAC} \cdot \mu \cdot (1 - \varepsilon_T)^2}{D_p^2 \cdot \varepsilon_T^3} \cdot v + \frac{1,75 \cdot L_{GAC} \cdot \rho \cdot (1 - \varepsilon_T)}{D_p \cdot \varepsilon_T^3} \cdot v^2$$

Tomando los valores para el caso de la columna diseñada:

$$\Delta P = \frac{150 \cdot 6 \text{ m} \cdot 0,001 \text{ Pa} \cdot \text{s} \cdot (1 - 0,45)^2}{(1,05 \cdot 10^{-3} \text{ m})^2 \cdot 0,45^3} \cdot \frac{0,4482}{3600} \text{ m/s} + \frac{1,75 \cdot 6 \text{ m} \cdot 1000 \text{ kg/m}^3 \cdot (1 - 0,45)}{1,05 \cdot 10^{-3} \text{ m} \cdot 0,45^3} \cdot \left(\frac{0,4482}{3600} \text{ m/s}\right)^2$$

$$\Delta P = 338,317 \text{ Pa}$$

$$\Delta F_l = \frac{\Delta P}{\rho} = \frac{338,317 \text{ Pa}}{1000 \text{ kg/m}^3} = 0,338 \text{ J/kg}$$

Así, queda determinada la pérdida de carga mínima en la columna como $0,338 \text{ J/kg}$. Para tener en cuenta las pérdidas de energía adicionales provocadas por las incrustaciones, el ensuciamiento y el distribuidor de flujo, se multiplica por un factor de 1,4.

$$\Delta F = 0,338 \text{ J/kg} \cdot 1,4 = 0,474 \text{ J/kg}$$

En conclusión, queda determinada la pérdida de carga de la columna en $0,474 \text{ J/kg}$.

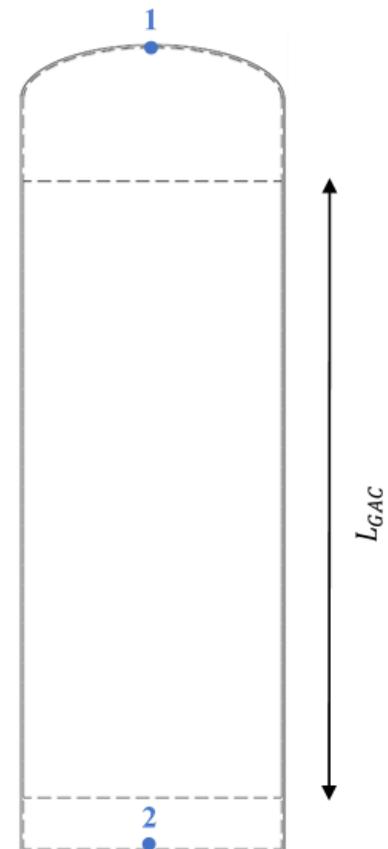


Figura 81: BEM a la columna de adsorción.

3.3. Diseño de la balsa pulmón

El diseño de esta balsa se realiza en base al tiempo que se desea acumular el agua en el depósito, el caudal de entrada y la relación deseada entre altura y diámetro. Estas condiciones de diseño consisten en:

- Caudal de alimentación, $Q_{v_0} = 4,4 \text{ m}^3/h$.
- Tiempo que se desea acumular el agua en el depósito, $t_{Acumulación} = 24 \text{ h}$
- Relación entre altura y diámetro, $L/D = 1$.

Mediante estos parámetros se puede determinar el volumen mínimo que ocupa el agua residual, o lo que es lo mismo, el volumen útil del tanque de almacenamiento (V_{Util}):

$$V_{Util} = Q_v \cdot t_{Acumulación} = 4,4 \text{ m}^3/h \cdot 24 \text{ h} = 105,6 \text{ m}^3$$

Una vez calculado este volumen se sobredimensiona con un factor de 1,25, es decir, se le añade un 25% más de espacio al tanque para asegurar un almacenamiento seguro en caso de fluctuaciones en el caudal o la aparición de cualquier problema:

$$V_{Tanque} = V_{Util} \cdot 1,25 = 105,6 \text{ m}^3 \cdot 1,25 = 132 \text{ m}^3$$

Teniendo en cuenta la condición de diseño que establece la altura (L) igual al diámetro (D) se pueden determinar ambas dimensiones mediante el volumen de que ocupa el tanque cilíndrico (V_{Tanque}):

$$V = A \cdot L = \frac{\pi}{4} \cdot D^2 \cdot L = 132 \text{ m}^3$$

Si se tiene en cuenta que la altura y el diámetro son de valor equivalente, ambos parámetros se pueden sustituir por una incógnita x con el fin de resolver la ecuación:

$$\frac{\pi}{4} \cdot x^3 = 132 \text{ m}^3$$

$$x = L = D = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot 132 \text{ m}^3}{\pi}} = 5,52 \text{ m}$$

Finalmente, a la altura calculada se le suman $0,5\text{ m}$ para evitar salpicaduras y reboses:

$$L = 5,52\text{ m} + 0,5\text{ m} = 6,02\text{ m}$$

Así pues, en consonancia con el anterior cálculo, la balsa pulmón tiene una altura de $6,02\text{ m}$ y su diámetro interno es de $5,52\text{ m}$.

3.4. Diseño del reactor de elevación de pH

El diseño de este recipiente se hace a partir de la elección de un tiempo de reacción que se establece en 15 *min*. A continuación, se expone en detalle el diseño:

$$\tau = \frac{V_{Util}}{Q_v} = 15 \text{ min} = 0,25 \text{ h}$$

$$V_{Util} = Q_v \cdot \tau = 4,4 \text{ m}^3/\text{h} \cdot 0,25 \text{ h} = 1,1 \text{ m}^3$$

Una vez calculado este volumen, se sobredimensiona con un factor de 1,5, es decir, se le añade un 50% más de espacio al tanque para asegurar que el hidróxido de sodio disponga de espacio disponible en el recipiente:

$$V_{Tanque} = V_{Util} \cdot 1,5 = 1,1 \text{ m}^3 \cdot 1,5 = 1,65 \text{ m}^3$$

Teniendo en cuenta la condición de diseño de que la altura (L) sea igual al diámetro (D) se pueden determinar ambas dimensiones mediante el volumen de que ocupa el tanque cilíndrico (V_{Tanque}):

$$V_{Tanque} = A \cdot L = \frac{\pi}{4} \cdot D^2 \cdot L = 1,65 \text{ m}^3$$

Si se tiene en cuenta que la altura y el diámetro son de valor equivalente, ambos parámetros se pueden sustituir por una incógnita x con el fin de resolver la ecuación:

$$\frac{\pi}{4} \cdot x^3 = 1,65 \text{ m}^3$$

$$x = L = D = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot 1,65 \text{ m}^3}{\pi}} = 1,28 \text{ m}$$

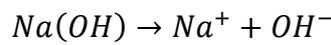
Finalmente, a la altura calculada se le suman 0,5 *m* para evitar salpicaduras y reboses:

$$L = 1,28 \text{ m} + 0,5 \text{ m} = 1,78$$

Así pues, en consonancia con el anterior cálculo, la altura del reactor de elevación de pH es de 1,78 *m* y su diámetro interno de 1,28 *m*.

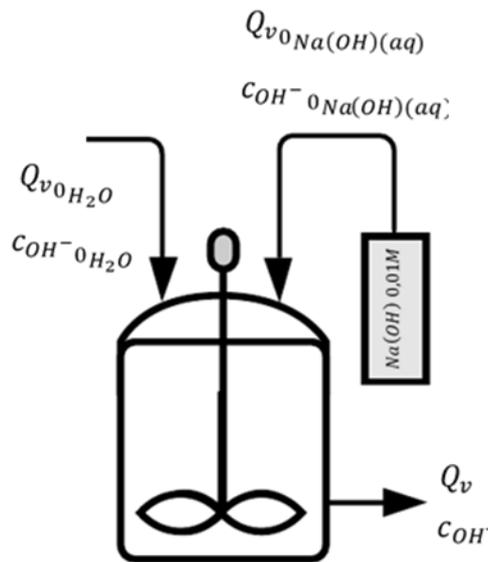
A continuación, se determina la magnitud aproximada del caudal de la disolución de hidróxido de sodio ($Q_{v0Na(OH)(aq)}$) que se debe verter al reactor para conseguir alcanzar un pH de 9. Este cálculo se basa en un balance de materia de componente al anión hidróxido (OH^-). Tomando el valor promedio de pH medido en la salida del tratamiento fisicoquímico (valores ubicados en la Tabla 16), se tiene en cuenta que el pH del agua a la entrada del reactor es de 7,8.

Se ha de tener en cuenta para este cálculo que la concentración del anión hidróxido (c_{OH^-}) que se aporta en la corriente de entrada de reactivo es equivalente a la concentración de reactivo ($c_{Na(OH)}$) en el interior del tanque de preparación de hidróxido de sodio. Esto es debido a que el hidróxido de sodio es una base fuerte y se disocia completamente:



$$c_{Na(OH)} = c_{OH^-}$$

Balance de materia al anión hidróxido (OH^-)



Salida – Entrada + Acumulación = Generación

$$\dot{m}_{OH^-} - \dot{m}_{OH^-0H_2O} - \dot{m}_{OH^-0Na(OH)(aq)} + \frac{dm_{OH^-}}{dt} = 0$$

$$c_{OH^-} \cdot Q_v - Q_{v0H_2O} \cdot c_{OH^-0H_2O} - c_{OH^-0Na(OH)(aq)} \cdot Q_{v0Na(OH)(aq)} + \frac{dm_{OH^-}}{dt} = 0$$

Considerando que el termino de acumulación es nulo y que el reactor funciona en sistema estacionario ($\frac{dm_{OH^-}}{dt} = 0$):

$$c_{OH^-} \cdot Q_v = Q_{v_{0_{H_2O}}} \cdot c_{OH^-_{0_{H_2O}}} + c_{OH^-_{0_{Na(OH)(aq)}}} \cdot Q_{v_{0_{Na(OH)(aq)}}$$

Despreciando el efecto del caudal incorporado de reactivo se puede decir que $Q_v \approx Q_{v_{0_{H_2O}}}$. Esta afirmación se puede hacer siempre y cuando $Q_{v_{0_{H_2O}}} \gg Q_{v_{0_{Na(OH)(aq)}}$. Así la ecuación es resoluble y se puede obtener el caudal de entrada del reactivo:

$$c_{OH^-} \cdot Q_{v_{0_{H_2O}}} = Q_{v_{0_{H_2O}}} \cdot c_{OH^-_{0_{H_2O}}} + c_{OH^-_{0_{Na(OH)(aq)}}} \cdot Q_{v_{0_{Na(OH)(aq)}}$$

$$Q_{v_{0_{Na(OH)(aq)}}} = \frac{(c_{OH^-} - c_{OH^-_{0_{H_2O}}}) \cdot Q_{v_{0_{H_2O}}}}{c_{OH^-_{0_{Na(OH)(aq)}}$$

$$Q_{v_{0_{Na(OH)(aq)}}} = \frac{(10^{-5} - 10^{6,2}) \text{ mol/L} \cdot 4,4 \text{ m}^3/\text{h}}{0,01 \text{ mol/L}} = 4,1224 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{h} = 68,706 \text{ mL/min}$$

Por lo que, teniendo en cuenta que el hidróxido de sodio se prepara con una concentración de 0,01 M, se puede calcular el caudal másico teórico de hidróxido de sodio ($\dot{m}_{Na(OH)}$):

$$\dot{m}_{NaOH} = Q_{v_{0_{Na(OH)(aq)}}} \cdot c_{Na(OH)_0} \cdot M_{n_{Na(OH)}}$$

$$\dot{m}_{Na(OH)} = 4,1224 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{h} \cdot 0,01 \text{ mol/L} \cdot \frac{1000 \text{ L}}{1 \text{ m}^3} \cdot 39,997 \text{ g/mol} = 1,649 \text{ g/h}$$

La relación de cantidad de hidróxido de sodio que se necesita para preparar un volumen de 1 L de disolución ($Na(OH)(aq)$) es la siguiente:

$$m_{Na(OH)} = c_{Na(OH)_0} \cdot M_{n_{Na(OH)}} = 0,01 \text{ mol/L} \cdot 39,997 \text{ g/mol} = 0,4 \text{ g/L}$$

A continuación, se procede a calcular el volumen del tanque de almacenamiento y preparación de la disolución de hidróxido de sodio con tal de conseguir una autonomía de 14 días en el sistema:

$$V_{\text{útil}} = Q_{v_{Na(OH)(aq)}} \cdot t_{\text{autonomía}} = 4,1224 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{h} \cdot 14 \text{ días} \cdot \frac{24 \text{ h}}{1 \text{ día}} = 1,385 \text{ m}^3$$

Aunque este cálculo es correcto, siempre podría haber variaciones que provoquen una dosificación mayor a la supuesta en el cálculo, por esta razón se diseña el recipiente con el caudal máximo suministrable por la bomba dosificadora descrito en la Tabla 23:

$$V_{\text{Útil}} = Q_{vNa(OH)l(aq)} \cdot t_{\text{autonomía}} = 0,0047 \text{ m}^3/\text{h} \cdot 14 \text{ días} \cdot \frac{24 \text{ h}}{1 \text{ día}} = 1,579 \text{ m}^3$$

Una vez calculado este volumen se sobredimensiona con un factor de 1,25, es decir, se le añade un 25% más de espacio al depósito para asegurar un almacenamiento seguro según las consideraciones técnicas:

$$V_{\text{Depósito Na(OH)}} = V_{\text{Útil}} \cdot 1,25 = 1,579 \text{ m}^3 \cdot 1,25 = 1,974 \text{ m}^3$$

Teniendo en cuenta la condición de diseño que establece la altura (L) igual al diámetro (D) se pueden determinar ambas dimensiones mediante el volumen de que ocupa el tanque cilíndrico ($V_{\text{Depósito Na(OH)}}$):

$$V_{\text{Depósito Na(OH)}} = A \cdot L = \frac{\pi}{4} \cdot D^2 \cdot L = 1,974 \text{ m}^3$$

Si se tiene en cuenta que la altura y el diámetro son de valor equivalente, ambos parámetros se pueden sustituir por una incógnita x con el fin de resolver la ecuación:

$$\frac{\pi}{4} \cdot x^3 = 1,974 \text{ m}^3$$

$$x = L = D = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot 1,974 \text{ m}^3}{\pi}} = 1,36 \text{ m}$$

Se añaden 0,5 m más de altura para evitar reboses o salpicaduras indeseadas.

$$L = 1,36 \text{ m} + 0,5 \text{ m} = 1,86 \text{ m}$$

Finalmente, la altura es de 1,86 m y el diámetro del depósito es de 1,36 m

3.5. Diseño de la operación de adsorción con GAC impregnado

El diseño de esta operación de adsorción se lleva a cabo siguiendo el método de escalado propuesto en el apartado 5.5.6.3. Método LUB de la memoria. A partir de los experimentos a escala laboratorio introducidos en el apartado 2. Experimentos de adsorción de boro a escala laboratorio de estos anexos se consigue obtener toda la información experimental necesaria para poder realizar el escalado sin problemas.

Como ya se ha mencionado en el punto pertinente de la memoria, para realizar el escalado a tamaño industrial se debe poder admitir que la curva de ruptura a nivel de laboratorio tiene la misma forma que la curva de ruptura a escala industrial. Este requisito sólo puede satisfacerse cuando se cumplen ciertas condiciones entre la escala industrial (subíndice 2) y la escala laboratorio (subíndice 1). A continuación, se presentan cada una de las condiciones con su debida justificación:

- 1) Similitud geométrica entre ambas escalas $\left(\frac{L_1}{D_1} \approx \frac{L_2}{D_2}\right)$.

Ya que la relación altura-diámetro del lecho de adsorción a escala industrial era conocida con anterioridad a la realización de los experimentos en el laboratorio (fue proporcionada por la empresa encargada del GAC y de la distribución de las columnas de adsorción, para más información acudir al apartado 6. Análisis de soluciones de la memoria), el lecho de adsorción a escala laboratorio fue diseñado para que cumpliera estrictamente la misma relación geométrica altura-diámetro. De esta forma se consigue avalar esta similitud geométrica.

- 2) Similitud térmica entre ambas escalas $(T_1 \approx T_2)$.

El experimento fue llevado a cabo a la temperatura ambiente del laboratorio (20°C aproximadamente constantes). La columna escala industrial funcionará también a la temperatura ambiental del lugar en el que se instala.

- 3) Similitud cinemática. Las propiedades físicas del fluido se mantienen similares para garantizar el mismo régimen de transferencia de materia en ambas escalas.

En ambas escalas el fluido es agua que circula a la misma velocidad (0,3 m/h).

- 4) Similitud dinámica $(Re_{m_1} \approx Re_{m_2})$.

El régimen de circulación en ambas escalas es igual, pues todos los parámetros necesarios para determinar el módulo de Reynolds se mantienen constantes.

- 5) Usar el mismo adsorbente y fluido en ambas escalas.

El fluido que se trata tanto en una escala como en la otra es agua. Aunque en el caso de la escala industrial el agua pueda ser de menor calidad, las etapas de depuración anteriores garantizan una eliminación suficiente en sólidos suspendidos, turbidez y compuestos orgánicos como para evitar desviaciones alarmantes. El adsorbente es exactamente el mismo.

- 6) Usar la misma concentración constante de alimentación en ambas escalas ($c_{0_1} \approx c_{0_2}$).

La concentración de los compuestos de boro se mantiene aproximadamente constante a escala industrial, mientras que en el experimento se mantuvo una concentración constante en la entrada igual a la concentración media observada en el agua residual (10 mg/mol).

- 7) La velocidad superficial del líquido debe ser baja para asegurar un menor error al aproximar la curva al escalón ideal.

Como ya se ha indicado en el apartado 2. Experimentos de adsorción de boro a escala laboratorio, se determinó experimentalmente que una velocidad de $0,3 \text{ m/h}$ es la más indicada para alcanzar un compromiso entre la retención de compuestos de boro y la velocidad de la operación.

- 8) El lecho debe estar bien empaquetado y asegurar una buena distribución de la mezcla. Si existen discrepancias en la cantidad de materia dispersada en los ejes axiales entre una columna y otra, existe también riesgo de discrepancias en los resultados.

Para asegurar este último requisito en ambas columnas se coloca un distribuidor del flujo que asegure la homogeneidad del agua en toda la sección del lecho desde su inicio.

En conclusión, todas las condiciones necesarias para aplicar el escalado se cumplen satisfactoriamente y, por lo tanto, se puede admitir que la cantidad de sustancia adsorbida en el equilibrio por unidad de masa del adsorbente (q_{aeq}), tiene el mismo valor para ambas escalas. Es decir:

$$q_{aeq_1} = q_{aeq_2} = 2,4378 \text{ g boro/kg GACI}$$

Así, definiendo los siguientes parámetros de diseño:

- Caudal de alimentación, $Q_{v_{0_2}} = 4,4 \text{ m}^3/\text{h}$.
- Concentración de la alimentación, $c_{a_{0_2}} = 10 \text{ mg B/L}$.
- Área de la sección del lecho, $A_2 = 4,91 \text{ m}^2$.
- Altura del lecho, $L_{GACI} = L_2 = 6 \text{ m}$.

Y siguiendo los tres pasos descritos en el apartado referente al Método LUB de la memoria se puede determinar la dimensión útil del lecho y el tiempo de ruptura de este. Seguidamente se describen los cálculos realizados en cada uno de estos pasos:

Primero, mediante la ecuación (24), se determina la longitud del lecho no utilizado en la columna industrial (L_{LUB_2}):

$$L_{LUB_2} = \frac{v_2}{v_1} \cdot L_{LUB_1} = 1 \cdot 4,41 \text{ cm} = 4,41 \text{ cm}$$

Debido a que la transición de la escala laboratorio a la escala industrial implica un salto de más de 1000 unidades en dimensiones (se pasa de un lecho de adsorción de 0,23 kg a uno de 16,641 ton) y realizar el cálculo anterior puede obviar posibles errores o desviaciones que solo se manifiesten a gran escala, se toma la decisión de aplicar un factor de seguridad de 2,5. Este factor sobredimensiona la longitud no utilizada calculada, pero asegura una mejor aproximación a la realidad. Por lo tanto, aplicando este factor, el valor queda de la siguiente forma:

$$L_{LUB_2} = 2,5 \cdot 4,41 \text{ cm} = 11,025 \text{ cm}$$

En segundo lugar, tomando la ecuación (25), se determina cual es el volumen útil del lecho para la adsorción (V_{LES_2}):

$$V_{LES_2} = L_2 \cdot A_2 - V_{LUB_2} = 6 \text{ m} \cdot \frac{\pi}{4} \cdot 2,5^2 \text{ m}^2 - 11,025 \cdot 10^{-2} \text{ m} \cdot \frac{\pi}{4} \cdot 2,5^2 \text{ m}^2 = 28,911 \text{ m}^3$$

Por último, se aplica la ecuación (26) con el fin de calcular el tiempo de ruptura (t_{B_2}):

$$t_{B_2} = \frac{\rho_{Lecho} \cdot q_{a_{eq}} \cdot V_{LES_2}}{Q_{v_{O_2}} \cdot c_{a_0}} = \frac{565 \text{ kg GACI/m}^3 \cdot 2,4378 \text{ g B/kg IGAC} \cdot 28,911 \text{ m}^3}{Q_{v_{O_2}} \cdot 10 \text{ g B/m}^3}$$

Para ello se determina cual es el caudal a través de la columna ($Q_{v_{O_2}}$ o, $Q_{v_{Columna \text{ GACI}}}$):

$$Q_{v_{Columna \text{ GACI}}} = Q_{v_{O_2}} = v_2 \cdot A_2 = 0,3 \text{ m/h} \cdot \frac{\pi}{4} \cdot 2,5^2 \text{ m}^2 = 1,4726 \text{ m}^3/\text{h}$$

Ya que todo el cálculo se basa en una extrapolación de los resultados experimentales y en estos no se ha tenido en cuenta en ningún momento que la columna realmente está rellena y la sección transversal es menor a la de la columna vacía, no es necesario ajustar los resultados con valores de porosidad u

otros parámetros relacionados con las oquedades. Es decir, como se está utilizando una visión macroscópica o, también llamada, de caja negra, para ambas escalas no es necesario corregir los datos experimentales ni los de diseño con parámetros de porosidad, tortuosidad o similares. Por esta razón, al calcular el caudal que transcurre a través de la columna de adsorción no es necesario tener en cuenta que la columna está rellena, sino que se puede aplicar el cálculo obviando el relleno y tomando la sección transversal de la columna como el valor del área por la que circula el fluido.

Finalmente:

$$t_{B_2} = \frac{565 \text{ kg GACI/m}^3 \cdot 2,4378 \text{ g B/kg IGAC} \cdot 28,911 \text{ m}^3}{1,4726 \text{ m}^3/\text{h} \cdot 10 \text{ g B/m}^3} = 2704,113 \text{ h}$$

Al igual que se utiliza un factor de seguridad en el cálculo de la longitud del lecho útil, para el tiempo de ruptura también se aplica un factor correctivo para disminuir en un 5% el valor obtenido. Esto es debido a las mismas razones por las que se aplica el factor en el anterior caso y las posibles perturbaciones que pueden ocurrir al utilizar la columna como, por ejemplo, la adsorción de solutos de diversa naturaleza.

Por lo tanto, el tiempo de ruptura se estima en:

$$t_{B_2} = 0,95 \cdot 2704,113 \text{ h} = 2568,907 \approx 108 \text{ días}$$

Aun con esta resolución, es recomendable que cuando la planta ya esté disponible y se encuentre operativa se analicen las columnas de adsorción para determinar cuáles son los parámetros definitivos de la misma de forma más precisa. Este análisis consiste en trazar la curva de ruptura experimental de la columna mediante la determinación en compuestos de boro de muestras tomadas periódicamente en el efluente. Al utilizar una curva de ruptura experimental para determinar la longitud de lecho no utilizada se obtendrá un valor mucho más preciso al calculado en este diseño, al igual que con el reto de valores.

Teniendo en cuenta que el caudal máximo de una columna de adsorción ($Q_{v\text{Columna GACI}}$), como ya se ha calculado anteriormente, es de $1,4726 \text{ m}^3/\text{h}$ y se quiere tratar un caudal de $4,4 \text{ m}^3/\text{h}$, es evidente que se deben utilizar varias columnas en paralelo de forma que el agua residual se divida en ramas y pueda ser depurada en su totalidad. El número de columnas en paralelo (n) se calcula a continuación:

$$n = \frac{Q_v}{Q_{v\text{Columna GACI}}} = \frac{4,4 \text{ m}^3/\text{h}}{1,4726 \text{ m}^3/\text{h}} = 2,988 \approx 3$$

Por lo tanto, se deben de utilizar 3 columnas de IGAC para llevar a cabo esta etapa del tratamiento.

Dando uso a la ecuación (2) se calcula el módulo de Reynolds (Re_m) en el lecho poroso:

$$Re_m = \frac{\rho_f \cdot v \cdot D_p}{\mu \cdot (1 - \varepsilon)} = \frac{1000 \text{ kg/m}^3 \cdot 0,3 \text{ m/h} \cdot \frac{1 \text{ h}}{3600 \text{ s}} \cdot 1,05 \cdot 10^{-3} \text{ m}}{0,001 \text{ Pa} \cdot \text{s} \cdot (1 - 0,45)} = 0,16$$

A continuación, se procede a determinar la pérdida de carga mínima (ΔF) en la columna aplicando la ecuación de Ergun (14) que describe pérdida de carga provocada en el lecho. La columna de adsorción con GAC (Figura 81) es igual a la columna de adsorción con IGAC, excepto por la naturaleza del lecho adsorbente.

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{150 \cdot \mu \cdot (1 - \varepsilon_T)^2}{D_p^2 \cdot \varepsilon_T^3} \cdot v + \frac{1,75 \cdot \rho_f \cdot (1 - \varepsilon_T)}{D_p \cdot \varepsilon_T^3} \cdot v^2$$

$$\Delta P = \frac{150 \cdot L_{IGAC} \cdot \mu \cdot (1 - \varepsilon_T)^2}{D_p^2 \cdot \varepsilon_T^3} \cdot v + \frac{1,75 \cdot L_{IGAC} \cdot \rho \cdot (1 - \varepsilon_T)}{D_p \cdot \varepsilon_T^3} \cdot v^2$$

Tomando los valores para el caso de la columna diseñada:

$$\Delta P = \frac{150 \cdot 6 \text{ m} \cdot 0,001 \text{ Pa} \cdot \text{s} \cdot (1 - 0,45)^2}{(1,05 \cdot 10^{-3} \text{ m})^2 \cdot 0,45^3} \cdot \frac{0,3}{3600} \text{ m/s} + \frac{1,75 \cdot 6 \text{ m} \cdot 1000 \text{ kg/m}^3 \cdot (1 - 0,45)}{1,05 \cdot 10^{-3} \text{ m} \cdot 0,45^3} \cdot \left(\frac{0,3}{3600} \text{ m/s}\right)^2$$

$$\Delta P = 226,24 \text{ Pa}$$

$$\Delta F_l = \frac{\Delta P}{\rho} = \frac{226,24 \text{ Pa}}{1000 \text{ kg/m}^3} = 0,226 \text{ J/kg}$$

La pérdida de carga mínima de la columna queda determinada con un valor de $0,338 \text{ J/kg}$. Para tener en cuenta las pérdidas de energía adicionales provocadas por las incrustaciones, el ensuciamiento y el distribuidor de flujo, se multiplica por un factor de 1,4.

$$\Delta F = 0,226 \text{ J/kg} \cdot 1,4 = 0,316 \text{ J/kg}$$

En conclusión, queda determinada la pérdida de carga de la columna en $0,316 \text{ J/kg}$.

3.6. Diseño del reactor de disminución del pH

El diseño de este recipiente se hace a partir de la elección de un tiempo de reacción que se establece en 15 *min*. A continuación, se expone en detalle el diseño:

$$\tau = \frac{V_{Util}}{Q_v} = 15 \text{ min} = 0,25 \text{ h}$$

$$V_{Util} = Q_v \cdot \tau = 4,4 \text{ m}^3/\text{h} \cdot 0,25 \text{ h} = 1,1 \text{ m}^3$$

Una vez calculado este volumen, se sobredimensiona con un factor de 1,5, es decir, se le añade un 50% más de espacio al tanque para asegurar que el ácido clorhídrico tenga disponible espacio en el recipiente:

$$V_{Tanque} = V_{Util} \cdot 1,5 = 1,1 \text{ m}^3 \cdot 1,5 = 1,65 \text{ m}^3$$

Teniendo en cuenta la condición de diseño de que la altura sea igual a la anchura y al largo se pueden determinar ambas dimensiones mediante el volumen de que ocupa el tanque cúbico (V_{Tanque}):

$$V_{Tanque} = L^3 = 1,65 \text{ m}^3$$

$$L = \sqrt[3]{1,65} = 1,182 \text{ m}$$

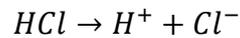
Finalmente, a la altura calculada se le suman 0,5 *m* para evitar salpicaduras y reboses:

$$L = 1,182 \text{ m} + 0,5 \text{ m} = 1,682 \text{ m}$$

Así pues, en consonancia con el anterior cálculo, la altura del reactor de disminución de pH es de 1,682 *m* y su anchura y largo de 1,182 *m*.

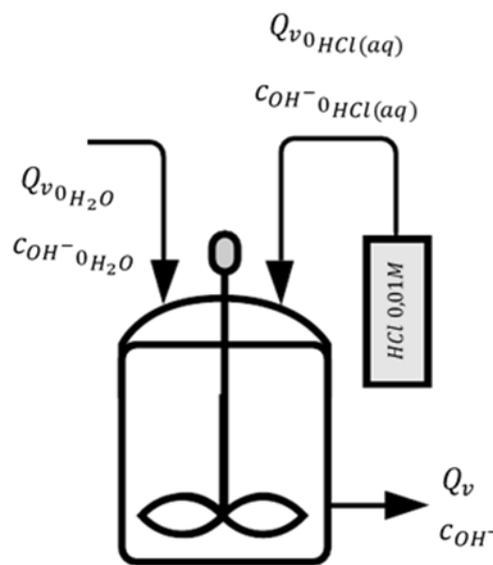
A continuación, se determina la magnitud aproximada del caudal de la disolución de ácido clorhídrico ($Q_{v_{0_{HCl(aq)}}}$) que se debe verter al reactor para conseguir reducir el pH a 7,5. Este cálculo se basa en un balance de materia de componente al anión hidróxido (OH^-). Tomando el valor teórico de pH en la salida del tratamiento reactor de elevación de pH , se establece que el pH del agua a la entrada del reactor es de 9.

Se ha de tener en cuenta para este cálculo que la concentración del anión hidróxido (c_{OH^-}) que se aporta en la corriente de entrada de reactivo es equivalente a la concentración de reactivo (c_{HCl}) en el interior del tanque de preparación del ácido clorhídrico. Esto es debido a que el ácido clorhídrico es un ácido fuerte y se disocia completamente:



$$c_{HCl} = c_{H^+} = 10^{-14} - c_{OH^-}$$

Balance de materia al anión hidróxido (OH^-)



Salida – Entrada + Acumulación = Generación

$$\dot{m}_{OH^-} - \dot{m}_{OH^-}0_{H_2O} - \dot{m}_{OH^-}0_{HCl(aq)} + \frac{dm_{OH^-}}{dt} = 0$$

$$c_{OH^-} \cdot Q_v - Q_{v0H_2O} \cdot c_{OH^-}0_{H_2O} - c_{OH^-}0_{HCl(aq)} \cdot Q_{v0HCl(aq)} + \frac{dm_{OH^-}}{dt} = 0$$

Considerando que el término de acumulación es nulo y que el reactor funciona en sistema estacionario ($\frac{dm_{OH^-}}{dt} = 0$):

$$c_{OH^-} \cdot Q_v = Q_{v0H_2O} \cdot c_{OH^-}0_{H_2O} + c_{OH^-}0_{HCl(aq)} \cdot Q_{v0HCl(aq)}$$

Despreciando el efecto del caudal incorporado de reactivo se puede decir que $Q_v \approx Q_{v_{0H_2O}}$. Esta afirmación se puede hacer siempre y cuando $Q_{v_{0H_2O}} \gg Q_{v_{0HCl(aq)}}$. Así la ecuación es resoluble y se puede obtener el caudal de entrada del reactivo:

$$c_{OH^-} \cdot Q_{v_{0H_2O}} = Q_{v_{0H_2O}} \cdot c_{OH^-_{0H_2O}} + c_{OH^-_{0HCl(aq)}} \cdot Q_{v_{0HCl(aq)}}$$

$$Q_{v_{0HCl(aq)}} = \frac{(c_{OH^-} - c_{OH^-_{0H_2O}}) \cdot Q_{v_{0H_2O}}}{c_{OH^-_{0HCl(aq)}}$$

$$Q_{v_{0HCl(aq)}} = \frac{(10^{-5} - 10^{-6,5}) \text{ mol/L} \cdot 4,4 \text{ m}^3/\text{h}}{0,01 \text{ mol/L}} = 4,261 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{h} = 71,014 \text{ mL/min}$$

$$Q_{v_{0HCl(aq)}} = 4,261 \text{ L/h}$$

A continuación, se procede a calcular el volumen del tanque de almacenamiento y preparación de la disolución de ácido clorhídrico con tal de conseguir una autonomía de 14 días en el sistema:

$$V_{\text{útil}} = Q_{v_{HCl(aq)}} \cdot t_{\text{autonomía}} = 4,261 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{h} \cdot 14 \text{ días} \cdot \frac{24 \text{ h}}{1 \text{ día}} = 1,432 \text{ m}^3$$

Aunque este cálculo es correcto, siempre podría haber variaciones que provoquen una dosificación mayor a la supuesta en el cálculo, por esta razón se diseña el recipiente con el caudal máximo suministrable por la bomba dosificadora descrito en la Tabla 23. Este cálculo es igual al llevado a cabo para obtener las dimensiones del depósito de almacenamiento y preparación del hidróxido de sodio en el apartado 3.4. Diseño del reactor de elevación de **pH**, por lo que se puede obviar y concluir directamente que, la altura es de 1,86 m y el diámetro del depósito es de 1,36 m.

El volumen de ácido clorhídrico al 37% en peso ($V_{HCl\ 37\%}$) que se necesita para preparar un volumen de 1 L de disolución ($V_{HCl(aq)}$) es el siguiente:

$$V_{HCl\ 37\%} \cdot c_{HCl\ 37\%} = V_{HCl\ 0,01M} \cdot c_{HCl\ 0,01M}$$

$$V_{HCl\ 37\%} = \frac{V_{HCl(aq)} \cdot c_{HCl(aq)}}{c_{HCl\ 37\%}} = \frac{1 \text{ L} \cdot 0,01 \text{ mol/L}}{0,37 \text{ kg} \cdot \frac{1000 \text{ g}}{1 \text{ kg}} \cdot \frac{1 \text{ mol}}{36,458 \text{ g}}} = 9,854 \cdot 10^{-4} \text{ L}$$

Es decir:

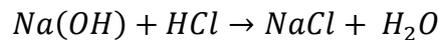
$$V_{HCl\ 37\%} = 9,854 \cdot 10^{-4} \cdot V_{HCl(aq)}$$

Teniendo en cuenta esta relación se puede calcular el caudal teórico de ácido clorhídrico al 37% requerido ($Q_{v_{HCl\ 37\%}}$):

$$Q_{v_{HCl\ 37\%}} = Q_{v_{0_{HCl(aq)}}} \cdot 9,854 \cdot 10^{-4} = 4,261\ L/h \cdot 9,854 \cdot 10^{-4} = 4,199 \cdot 10^{-3}\ L/h$$

$$Q_{v_{HCl\ 37\%}} = 4,199 \cdot 10^{-6}\ m^3/h$$

Por otro lado, también se puede establecer una relación teórica del volumen de hidróxido de sodio ($Na(OH)\ (aq)$) utilizado con el volumen de ácido clorhídrico ($HCl\ (aq)$). Teóricamente, si ambos reactivos, ácido clorhídrico e hidróxido de sodio, tienen una concentración igual, se prevé que para neutralizar el volumen de hidróxido de sodio añadido anteriormente será necesario añadir el mismo volumen, pero de ácido. Esto es debido a que ambos tienen comportamiento de ácido y de base fuerte respectivamente por lo que se disocian completamente, de forma que, mientras una molécula de ácido clorhídrico libera un catión hidrón (H^+), una molécula de hidróxido de sodio aporta un anión hidróxido OH^- . Es decir:



Entonces, como ya se ha mencionado, si la concentración es la misma para ambos reactivos, el volumen del ácido sulfúrico para neutralizar el efecto del hidróxido de sodio es el mismo:

$$n_{Na(OH)} = n_{HCl}$$

$$c_{Na(OH)(aq)} \cdot V_{Na(OH)(aq)} = c_{HCl(aq)} \cdot V_{HCl(aq)}$$

$$V_{HCl(aq)} = \frac{c_{Na(OH)(aq)}}{c_{HCl(aq)}} \cdot V_{Na(OH)(aq)}$$

$$V_{HCl(aq)} = V_{Na(OH)(aq)} \Big|_{\text{si } c_{Na(OH)(aq)} = c_{HCl(aq)}}$$

Aun así, puede ser que no se quiera neutralizar por completo la acción de la base, sino que solo se quiera alcanzar un valor de pH aceptable, en ese caso no se debe utilizar el mismo volumen, sino que se debe calcular el volumen en base al cambio de pH deseado.

3.7. Diseño del reactor de cloración

El diseño de este recipiente se hace a partir de la elección de un tiempo de reacción que se establece en 15 *min*. A continuación, se expone en detalle el diseño:

$$\tau = \frac{V_{Util}}{Q_v} = 15 \text{ min} = 0,25 \text{ h}$$

$$V_{Util} = Q_v \cdot \tau = 4,4 \text{ m}^3/\text{h} \cdot 0,25 \text{ h} = 1,1 \text{ m}^3$$

Una vez calculado este volumen, se sobredimensiona con un factor de 1,5, es decir, se le añade un 50% más de espacio al tanque para asegurar que el hidróxido de sodio disponga de espacio disponible en el recipiente:

$$V_{Tanque} = V_{Util} \cdot 1,5 = 1,1 \text{ m}^3 \cdot 1,5 = 1,65 \text{ m}^3$$

Teniendo en cuenta la condición de diseño de que la altura (L) sea igual al diámetro (D) se pueden determinar ambas dimensiones mediante el volumen de que ocupa el tanque cilíndrico (V_{Tanque}):

$$V_{Tanque} = A \cdot L = \frac{\pi}{4} \cdot D^2 \cdot L = 1,65 \text{ m}^3$$

Teniendo en cuenta la condición de diseño de que la altura sea igual a la anchura y al largo se pueden determinar ambas dimensiones mediante el volumen de que ocupa el tanque cúbico (V_{Tanque}):

$$V_{Tanque} = L^3 = 1,65 \text{ m}^3$$

$$L = \sqrt[3]{1,65} = 1,182 \text{ m}$$

Finalmente, a la altura calculada se le suman 0,5 *m* para evitar salpicaduras y reboses:

$$L = 1,182 \text{ m} + 0,5 \text{ m} = 1,682 \text{ m}$$

Así pues, en consonancia con el anterior cálculo, la altura del tanque de cloración es de 1,682 *m* y su anchura y largo de 1,182 *m*.

Se considera necesaria la incorporación de 0,5 mg de cloro activo por litro de agua, y un tiempo de residencia de 30 minutos. A continuación, se lleva a cabo el diseño del depósito de almacenaje del hipoclorito de sodio ($NaClO(aq)$) a partir de esa dosis estimada (m_{NaClO}) de 0,5 mg/L:

Para empezar, teniendo en cuenta que la bomba de recirculación funciona con un caudal ($Q_{vRecirculación}$) de 2,2 m³/h, se puede determinar el caudal másico de hipoclorito de sodio (\dot{m}_{NaClO}):

$$\dot{m}_{NaClO} = Q_{vRecirculación} \cdot m_{NaClO} = 2,2 \text{ m}^3/\text{h} \cdot 0,5 \text{ g/m}^3 = 1,1 \text{ g/h} = 1,1 \cdot 10^{-3} \text{ kg/h}$$

Y teniendo en cuenta que el reactivo se encuentra al 10%, se puede obtener el caudal volumétrico de la disolución de hipoclorito de sodio ($Q_{vNaClO(aq)}$):

$$Q_{vNaClO(aq)} = \dot{m}_{NaClO} \cdot \frac{\%p_{NaClO}}{\rho_{NaClO(aq)}}$$

$$Q_{vNaClO(aq)} = 1,1 \cdot 10^{-3} \text{ kg/h} \cdot \frac{100 \text{ kg } NaClO(aq)}{10 \text{ kg } NaClO} \cdot \frac{1 \text{ m}^3 \text{ } NaClO(aq)}{1160 \text{ kg } NaClO(aq)} = 9,483 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{h}$$

$$Q_{vNaClO(aq)} = 9,483 \cdot 10^{-3} \text{ L/h}$$

Después de obtener este valor, se procede a calcular el volumen del tanque de almacenamiento de la disolución de hipoclorito de sodio con tal de conseguir una autonomía de 14 días en el sistema:

$$V_{\text{Útil}} = Q_{vNaClO(aq)} \cdot t_{\text{autonomía}} = 9,483 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{h} \cdot 14 \text{ días} \cdot \frac{24 \text{ h}}{1 \text{ día}} = 3,186 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$$

Aunque este cálculo es correcto, siempre podría haber variaciones que provoquen una dosificación mayor a la supuesta en el cálculo, por esta razón se diseña el recipiente con el caudal máximo suministrable por la bomba dosificadora descrito en la Tabla 23. Este cálculo es igual al llevado a cabo para obtener las dimensiones del depósito de almacenamiento y preparación del hidróxido de sodio en el apartado 3.4. Diseño del reactor de elevación de **pH**, por lo que se puede obviar y concluir directamente que, la altura es de 1,86 m y el diámetro del depósito es de 1,36 m.

3.8. Diseño del tanque final de almacenamiento

Lo primero que se debe establecer son las condiciones de diseño. Estas consisten en:

- Caudal de alimentación, $Q_{v_0} = 4,4 \text{ m}^3/\text{h}$.
- Tiempo que se desea acumular el agua en el depósito, $t_{\text{Acumulación}} = 1 \text{ día} = 24 \text{ h}$
- Relación entre altura y diámetro, $L/D = 1$.

Mediante estos parámetros se puede determinar el volumen mínimo que ocupa el agua residual, o lo que es lo mismo, el volumen útil del tanque de almacenamiento (V_{Util}):

$$V_{\text{Util}} = Q_v \cdot t_{\text{Acumulación}} = 4,4 \text{ m}^3/\text{h} \cdot 24 \text{ h} = 105,6 \text{ m}^3$$

Una vez calculado este volumen se sobredimensiona con un factor de 1,25, es decir, se le añade un 25% más de espacio al tanque para asegurar un almacenamiento seguro en caso de fluctuaciones en el caudal o la aparición de cualquier problema:

$$V_{\text{Tanque}} = V_{\text{Util}} \cdot 1,25 = 105,6 \text{ m}^3 \cdot 1,25 = 132 \text{ m}^3$$

Teniendo en cuenta la condición de diseño que establece la altura (L) igual al diámetro (D) se pueden determinar ambas dimensiones mediante el volumen de que ocupa el tanque cilíndrico (V_{Tanque}):

$$V = A \cdot L = \frac{\pi}{4} \cdot D^2 \cdot L = 132 \text{ m}^3$$

Si se tiene en cuenta que la altura y el diámetro son de valor equivalente, ambos parámetros se pueden sustituir por una incógnita x con el fin de resolver la ecuación:

$$\frac{\pi}{4} \cdot x^3 = 132 \text{ m}^3$$

$$x = L = D = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot 132 \text{ m}^3}{\pi}} = 5,52 \text{ m}$$

Finalmente, a la altura calculada se le suman 0,5 m para evitar salpicaduras y reboses:

$$L = 5,52 \text{ m} + 0,5 \text{ m} = 6,02 \text{ m}$$

Así pues, en consonancia con el anterior cálculo, la balsa pulmón tiene una altura de $6,02 \text{ m}$ y su diámetro interno es de $5,52 \text{ m}$.

3.9. Diseño de las conducciones hidráulicas

En este apartado se describen los cálculos justificativos para seleccionar las características y dimensiones de las conducciones hidráulicas y las bombas centrífugas de impulsión.

Primero, para determinar el diámetro de las conducciones se debe consultar la velocidad a la que se necesita que circule el agua. Para algunas de las operaciones la velocidad es un parámetro de diseño, por lo que, la velocidad en los conductos predecesores a esas operaciones debe corresponderse con ese valor con el que se desea operar.

Para facilitar la organización de este apartado se divide en tramos las conducciones que se van a dimensionar. En la Figura 82 se puede ver un diagrama representativo del tratamiento terciario (la dimensión de los equipos no es representativa en esta figura, únicamente se utiliza a modo de guía para delimitar los tramos) y en la Tabla 52 se organizan y describen los susodichos tramos.

Tabla 52: Descripción de los tramos de las conducciones hidráulicas.

Tramo	Descripción
1	Desde la balsa de homogeneización final del tratamiento primario hasta la bifurcación anterior a la operación de filtración.
2	Desde la bifurcación anterior a la operación de filtración hasta la entrada a los filtros de profundidad con arena.
3	Desde la salida de los filtros de profundidad con arena hasta la balsa de homogenización del tratamiento primario.
4	Desde la salida del tanque final de almacenamiento hasta la entrada a los filtros.
5	Desde la salida de los filtros hasta la convergencia de ambas ramas.
6	Desde la convergencia de ramas posterior a la operación de filtración hasta la bifurcación anterior a la operación de adsorción con GAC.
7	Desde la bifurcación anterior a la operación de adsorción con GAC hasta la entrada a las columnas de adsorción con GAC.
8	Desde la salida de las columnas de adsorción con GAC hasta la convergencia de ambas ramas.
9	Desde la convergencia de ramas posterior a la operación de adsorción con GAC hasta la entrada de la balsa pulmón.
10	Desde la salida de la balsa pulmón hasta la entrada al reactor de elevación de pH
11	Desde la salida del depósito de hidróxido de sodio hasta la entrada al reactor de elevación de pH .
12	Desde la salida del reactor de elevación del pH hasta la trifurcación anterior a la operación de adsorción con IGAC.
13	Desde la trifurcación anterior a la operación de adsorción con IGAC hasta la entrada a las columnas de adsorción con IGAC.

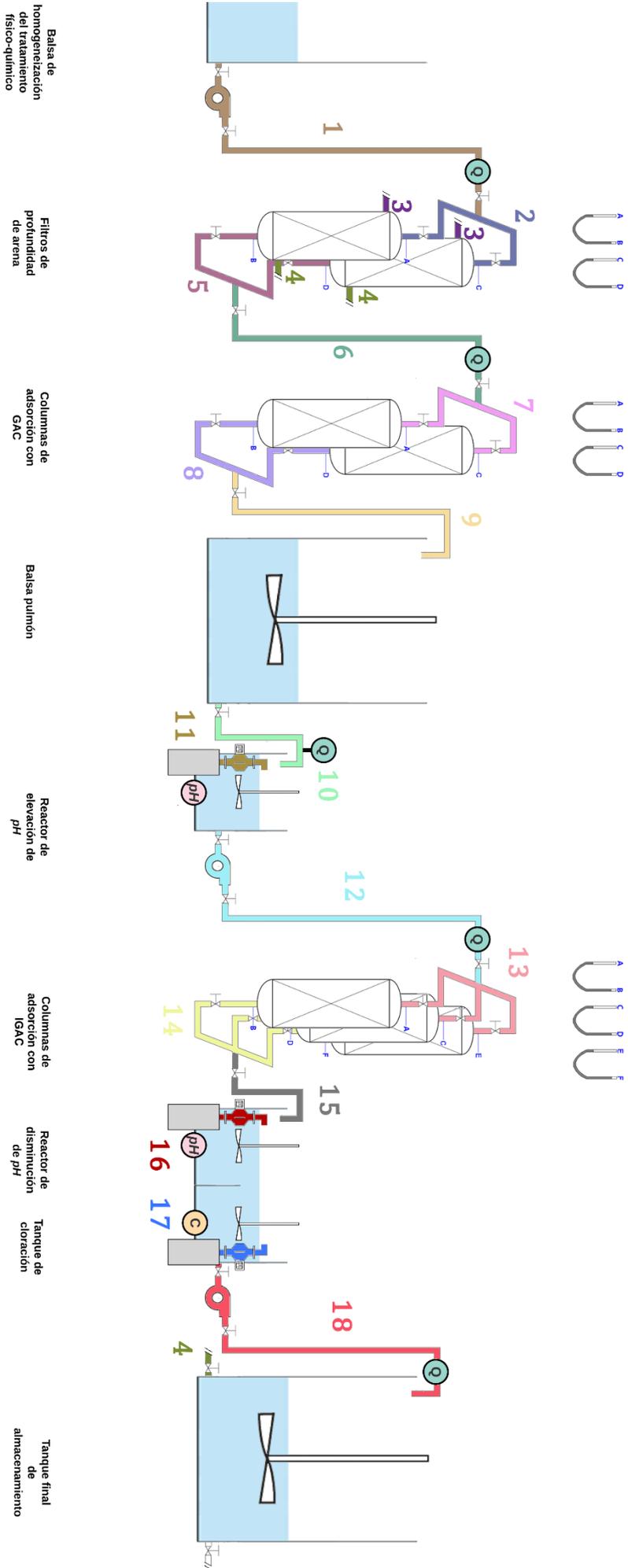


Figura 82: Organización de los tramos de las conducciones hidráulicas en el tratamiento terciario (dimensiones no representativas).

14	Desde la salida de las columnas de adsorción con IGAC hasta la convergencia de las tres ramas.
15	Desde la convergencia de ramas posterior a la operación de adsorción con IGAC hasta reactor de disminución de pH .
16	Desde la salida del depósito de hidróxido de sodio hasta el reactor de disminución de pH .
17	Desde el depósito de almacenaje de hidróxido de sodio hasta la entrada al tanque final de almacenamiento.
18	Desde la salida del tanque de cloración hasta la entrada al tanque final de almacenamiento.

Cabe señalar que todas las conducciones son de acero comercial y se han utilizado las siguientes recomendaciones de la Tabla 53 para estar dentro de los rangos recomendados:

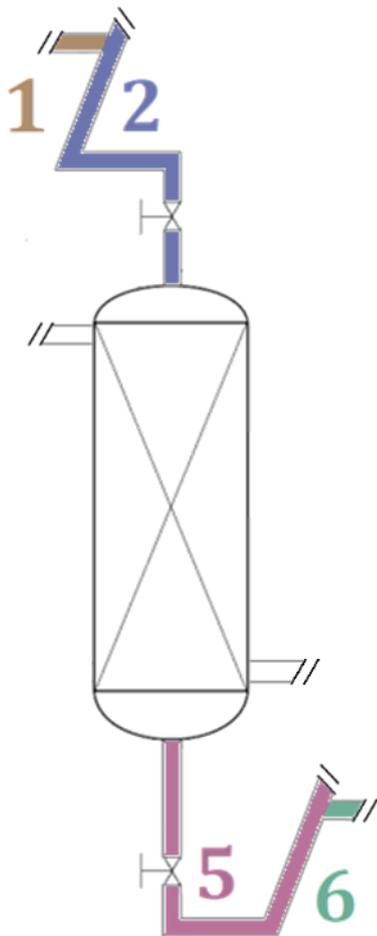
*Tabla 53: Velocidades típicas de líquidos en tuberías de acero.
(m/s) (Rodrigo Carbonell, 2003)*

Agua	$D \leq 2''$	$3'' < D < 10''$	$10'' < D < 20$
Succión bomba	0,3 – 0,6	0,6 – 1,2	1 – 2
Descarga bomba	0,5 – 1	1 – 1,5	1,2 – 2
Desagües	1 – 1,2	1 – 1,5	–

- **Tramo 1, tramo 2, tramo 5 y tramo 6:**

Debido a que estos dos tramos, 2 y 5, son simétricos se puede aprovechar el cálculo de uno para el otro y, si se tiene en cuenta que, aunque existan bifurcaciones, las ramas en las que se divide el tramo son simétricas y exactamente iguales también se pueden simplificar el cálculo y hacerlo para una única rama de uno de los dos tramos. El tramo 1 y el tramo 6 también se puede agrupar en este cálculo debido a que el caudal con el que trabajan es el mismo que el de los tramos 2 y 5.

De esta forma, sabiendo que el caudal es constante tanto dentro del filtro de profundidad de arena, como en las tuberías antecesoras y posteriores (aunque la conducción se divide en dos, solo habrá acceso a un filtro al mismo tiempo, por lo que circulará la totalidad del caudal por ella), se puede determinar el diámetro fijando un valor de velocidad en los tubos:



$$Q_{v_{T_1}} = Q_{v_{T_2}} = Q_{v_F} = Q_{v_{T_5}} = Q_{v_{T_6}}$$

$$A_{T_1} \cdot v_{T_1} = A_{T_2} \cdot v_{T_2} = A_F \cdot v_F = A_{T_5} \cdot v_{T_5} = A_{T_6} \cdot v_{T_6}$$

Entonces, teniendo en cuenta que se desea un mismo diámetro y velocidad para estos 4 tramos, expresando la ecuación de la siguiente forma para poder ser resuelta:

$$A_T \cdot v_T = Q_{v_F}$$

El valor de v_T debe ser escogido y fijado de tal forma que se cumpla las recomendaciones de la Tabla 53:

$$\frac{\pi}{4} \cdot D_T^2 \cdot v_T = Q_{v_F}$$

$$D_T = \sqrt{\frac{4}{\pi} \cdot \frac{Q_{v_F}}{v_T}} = \sqrt{\frac{4}{\pi} \cdot \frac{4,4 \text{ m}^3/\text{h} \cdot \frac{1 \text{ h}}{3600 \text{ s}}}{0,6 \text{ m/s}}} = 0,0509 \text{ m} \approx 2''$$

En conclusión, en el tramo 1, 2, 5 y 6 la velocidad del agua es de $0,6 \text{ m/s}$ y el diámetro de la conducción de $2''$.

- **Tramo 3 y tramo 4 (circuito del agua de limpieza):**

Teniendo en cuenta que la velocidad de lavado de los filtros de profundidad es de 14 m/h , se puede determinar cuál es el caudal en este caso y, por tanto, se puede dimensionar el diámetro de la tubería seleccionando una velocidad de transmisión:

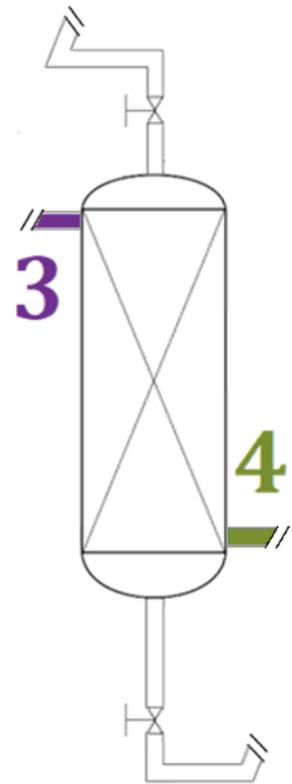
$$Q_v = A \cdot v$$

$$Q_{v_{T_3}} = Q_{v_{T_4}} = Q_{v_L}$$

$$A_{T_3} \cdot v_{T_3} = A_{T_4} \cdot v_{T_4} = A_L \cdot v_L$$

Entonces la ecuación se puede expresar de la siguiente forma para poder ser resuelta:

$$A_T \cdot v_T = Q_{v_L}$$



El valor de v_T debe ser escogido y fijado de tal forma que se cumpla las recomendaciones de la Tabla 53.

$$\frac{\pi}{4} \cdot D_T^2 \cdot v_T = Q_{v_F}$$

$$D_T = \sqrt{\frac{4}{\pi} \cdot \frac{Q_{v_L}}{v_T}} = \sqrt{\frac{4}{\pi} \cdot \frac{\frac{\pi}{4} \cdot D^2 \cdot v_L}{0,6 \text{ m/s}}} = \sqrt{\frac{(0,62 \text{ m})^2 \cdot 14 \text{ m/h} \cdot \frac{1 \text{ h}}{3600 \text{ s}}}{0,58 \text{ m/s}}} = 0,0508 \text{ m} \approx 2''$$

En conclusión, en el tramo 3 y 4 la velocidad del agua es de $0,58 \text{ m/s}$ y el diámetro de la conducción de $2''$.

- **Tramo 7 y tramo 8:**

Debido a que estos dos tramos son simétricos se puede aprovechar el cálculo de uno para el otro y, si se tiene en cuenta que, aunque existan bifurcaciones, las ramas en las que se divide el tramo son simétricas y exactamente iguales también se pueden simplificar el cálculo y hacerlo para una única rama de uno de los dos tramos.

Para estos tramos hay que tener en cuenta que el caudal es igual a la mitad del caudal en el tramo 6 debido a la bifurcación. Por lo tanto, se cumple que:

$$Q_{v_{T_7}} = Q_{v_{T_8}} = \frac{Q_{v_{T_6}}}{2} = \frac{4,4 \text{ m}^3/\text{h}}{2} = 2,2 \text{ m}^3/\text{h}$$

Este caudal es igual al caudal al que opera la columna de adsorción.:

$$Q_{v_{T_7}} = Q_{v_{T_8}} = Q_{v_C}$$

$$A_{T_7} \cdot v_{T_7} = A_{T_8} \cdot v_{T_8} = A_C \cdot v_C$$

Por lo tanto, se procede a determinar las dimensiones de la conducción en los tramos 7 y 8. Teniendo en cuenta que se desea un mismo diámetro y velocidad para estos 2 tramos, expresando la ecuación de la siguiente forma para poder ser resuelta:

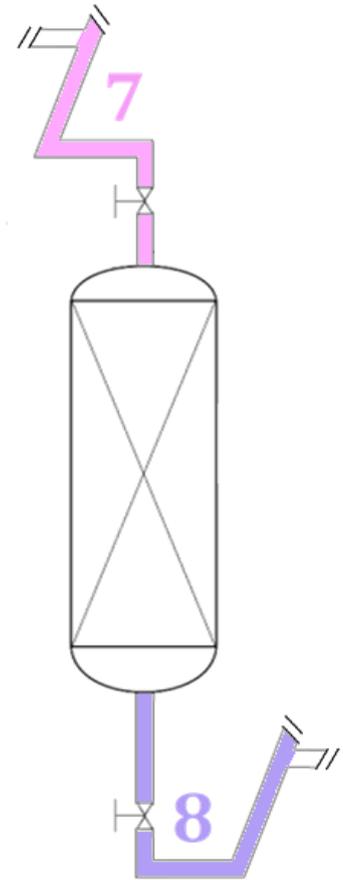
$$A_T \cdot v_T = Q_{v_C}$$

El valor de v_T debe ser escogido y fijado de tal forma que se cumpla las recomendaciones de la Tabla 53.

$$\frac{\pi}{4} \cdot D_T^2 \cdot v_T = Q_{v_F}$$

$$D_T = \sqrt{\frac{4}{\pi} \cdot \frac{Q_{v_F}}{v_T}} = \sqrt{\frac{4}{\pi} \cdot \frac{2,2 \text{ m}^3/\text{h} \cdot \frac{1 \text{ h}}{3600 \text{ s}}}{0,3 \text{ m/s}}} = 0,0509 \text{ m} \approx 2''$$

Así pues, en el tramo 7 y 8 la velocidad del agua es de $0,3 \text{ m/s}$ y el diámetro de la conducción de $2''$.



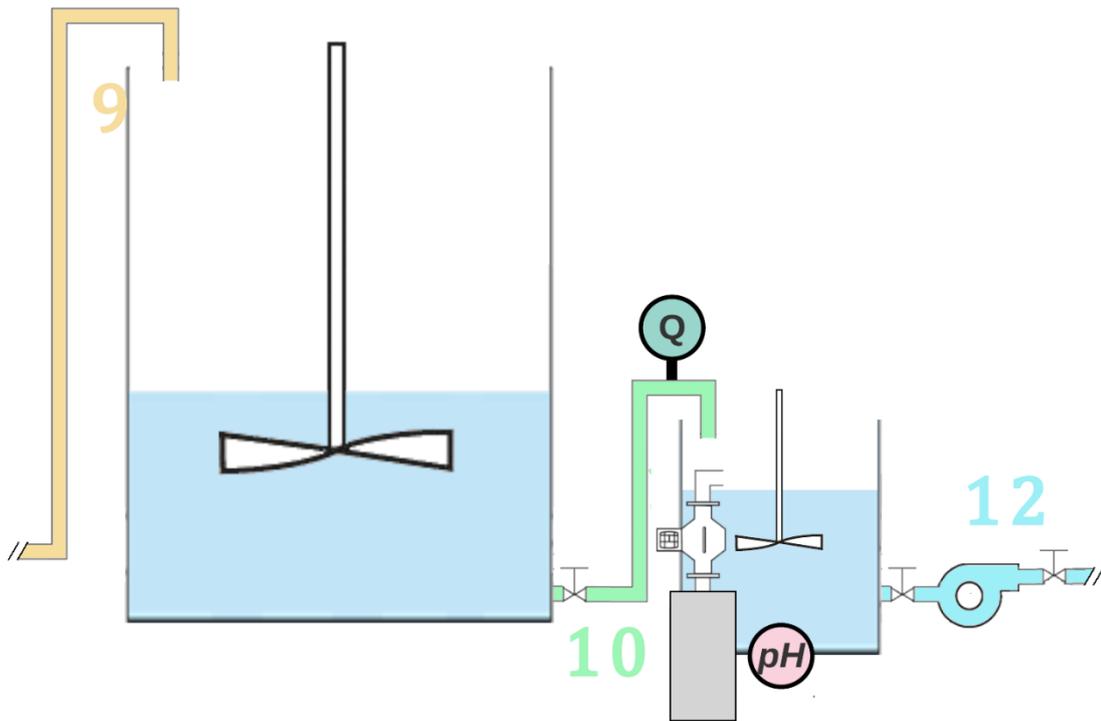
- **Tramo 9, tramo 10 y tramo 12:**

Ya que:

$$Q_{vT_9} = 2 \cdot Q_{vT_7} = 2 \cdot Q_{vT_8}$$

$$Q_{vT_9} = 2 \cdot 2,2 \text{ m}^3/\text{h} = 4,4 \text{ m}^3/\text{h}$$

El caudal en estos tramos es igual al del primer grupo dimensionado (tramos 1, 2, 5 y 6) por lo que se puede admitir la misma dimensión y velocidad, es decir, en el tramo 9, 10 y 12 la velocidad del agua es de $0,6 \text{ m/s}$ y el diámetro de la conducción de 2".



- **Tramo 11 (circuito de $Na(OH)$ 0,01 M):**

Este tramo de conducción se dimensiona a partir del caudal máximo dosificable por la bomba instalada. La bomba dosificadora es la Memdos DX 4 de Lutz-Jesco, cuyas características se pueden consultar en la Tabla 23.

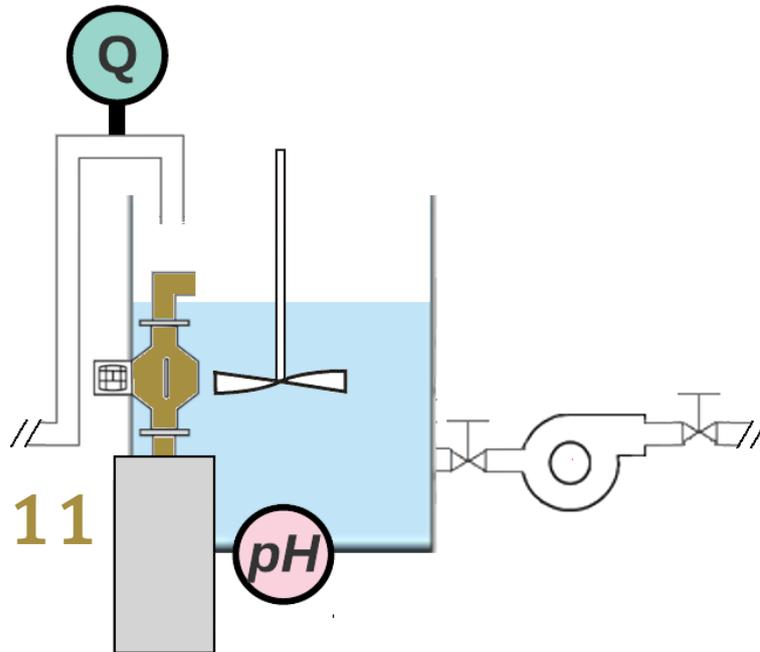
$$A_{T11} \cdot v_{T11} = Q_{vBomba}$$

El valor de v_{T11} debe ser escogido y fijado de tal forma que se cumpla las recomendaciones de la Tabla 53.

$$\frac{\pi}{4} \cdot D_{T11}^2 \cdot v_{T11} = Q_{vBomba}$$

$$D_{T11} = \sqrt{\frac{4}{\pi} \cdot \frac{Q_{vBomba}}{v_{T11}}} = \sqrt{\frac{4}{\pi} \cdot \frac{0,1854 \text{ m}^3/\text{h} \cdot \frac{1 \text{ h}}{3600 \text{ s}}}{0,4 \text{ m/s}}} = 0,0128 \text{ m} \approx 0,5''$$

En conclusión, en el tramo 11 la velocidad del agua es de $0,4 \text{ m/s}$ y el diámetro de la conducción de $0,5''$.



- **Tramo 13 y tramo 14:**

Debido a que estos dos tramos son simétricos se puede aprovechar el cálculo de uno para el otro y, si se tiene en cuenta que, aunque exista una trifurcación, las ramas en las que se divide el tramo son simétricas y exactamente iguales también se pueden simplificar el cálculo y hacerlo para una única rama de uno de los dos tramos.

Para estos tramos hay que tener en cuenta que el caudal es igual a un tercio del caudal en el tramo 11 debido a la trifurcación. Por lo tanto, se cumple que:

$$Q_{v_{T_{13}}} = Q_{v_{T_{14}}} = \frac{Q_{v_{T_{12}}}}{3} = \frac{4,4 \text{ m}^3/\text{h}}{3} = 1,467 \text{ m}^3/\text{h}$$

Este caudal es igual al caudal al que opera la columna de adsorción.:

$$Q_{v_{13}} = Q_{v_{T_{14}}} = Q_{v_C}$$

$$A_{T_{13}} \cdot v_{T_{13}} = A_{T_{14}} \cdot v_{T_{14}} = A_C \cdot v_C$$

Por lo tanto, se procede a determinar las dimensiones de la conducción en los tramos 13 y 14. Teniendo en cuenta que se desea un mismo diámetro y velocidad para estos 2 tramos, expresando la ecuación de la siguiente forma para poder ser resuelta:

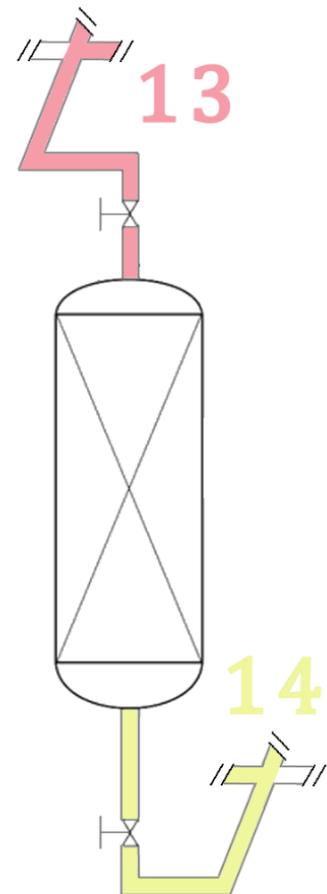
$$A_T \cdot v_T = Q_{v_C}$$

El valor de v_T debe ser escogido y fijado de tal forma que se cumpla las recomendaciones de la Tabla 53.

$$\frac{\pi}{4} \cdot D_T^2 \cdot v_T = Q_{v_F}$$

$$D_T = \sqrt{\frac{4}{\pi} \cdot \frac{Q_{v_F}}{v_T}} = \sqrt{\frac{4}{\pi} \cdot \frac{1,467 \text{ m}^3/\text{h} \cdot \frac{1 \text{ h}}{3600 \text{ s}}}{0,35 \text{ m/s}}} = 0,0385 \text{ m} \approx 1,5''$$

Así pues, en el tramo 13 y 14 la velocidad del agua es de $0,35 \text{ m/s}$ y el diámetro de $1,5''$.



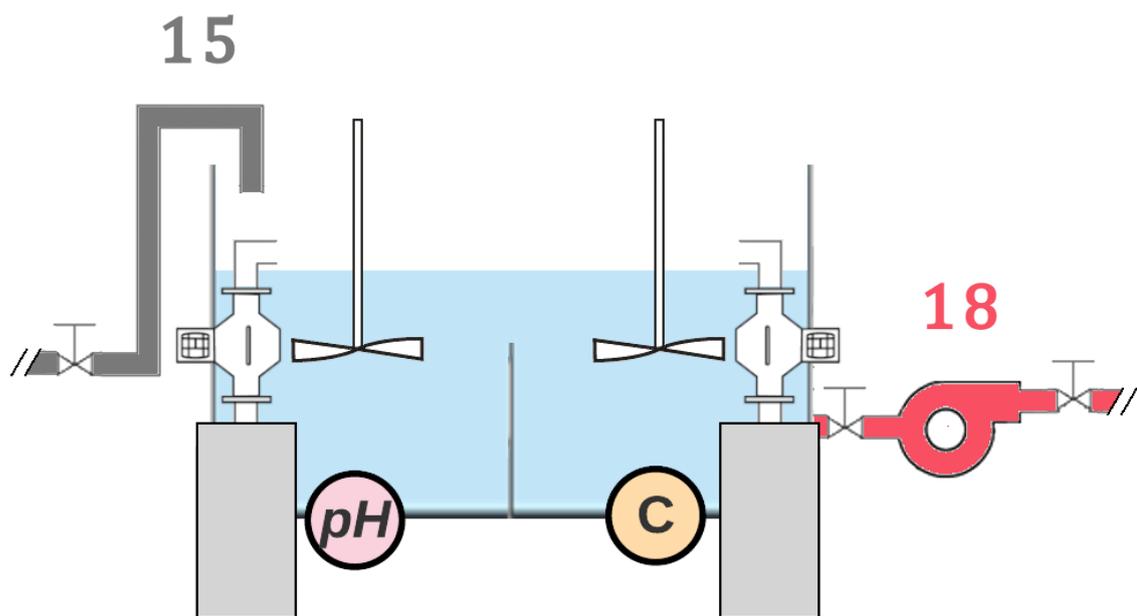
- **Tramo 15 y 18:**

Ya que:

$$Q_{vT_{15}} = 3 \cdot Q_{vT_{14}} = 3 \cdot Q_{vT_{13}}$$

$$Q_{vT_{15}} = 3 \cdot 1,467 \text{ m}^3/\text{h} = 4,4 \text{ m}^3/\text{h}$$

El caudal en este tramo es igual al del primer grupo dimensionado (tramos 1, 2, 5 y 6) por lo que se puede admitir la misma dimensión y velocidad, es decir, en los tramos 15 y 18 la velocidad del agua es de $0,6 \text{ m/s}$ y el diámetro de la conducción de 2".



• **Tramo 16 y tramo 17 (circuitos de HCl 0,01 M y $NaOCl$ 10% respectivamente):**

Estos tramos de conducción son de iguales características por lo que el diseño de uno es idéntico al del otro. Se dimensionan a partir del caudal máximo dosificable por la bomba instalada. La bomba dosificadora es la Memdos DX 4 de Lutz-Jesco, cuyas características se pueden consultar en la Tabla 23.

$$A_{T16} \cdot v_{T16} = A_{T17} \cdot v_{T17} = Q_{vBomba}$$

Expresando la ecuación de la siguiente forma para poder ser resuelta:

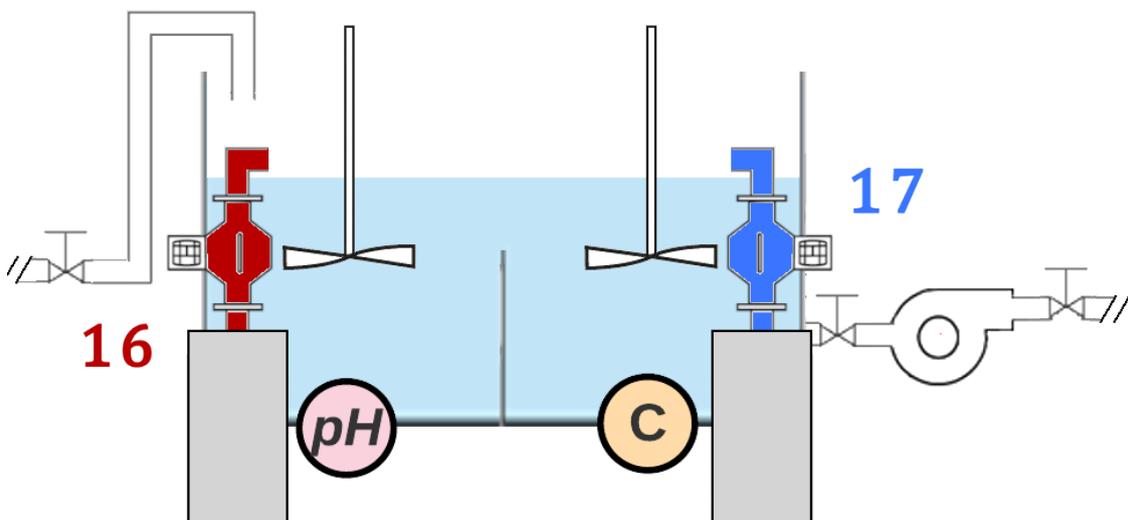
$$A_T \cdot v_T = Q_{vBomba}$$

El valor de v_T debe ser escogido y fijado de tal forma que se cumpla las recomendaciones de la Tabla 53.

$$\frac{\pi}{4} \cdot D_T^2 \cdot v_T = Q_{vBomba}$$

$$D_T = \sqrt{\frac{4}{\pi} \cdot \frac{Q_{vBomba}}{v_{T11}}} = \sqrt{\frac{4}{\pi} \cdot \frac{0,1854 \text{ m}^3/h \cdot \frac{1 \text{ h}}{3600 \text{ s}}}{0,4 \text{ m/s}}} = 0,0128 \text{ m} \approx 0,5''$$

En conclusión, en los tramos 16 y 17 la velocidad del agua es de 0,4 m/s y el diámetro de la conducción de 0,5".



Para poder seleccionar las bombas centrífugas más indicadas se procede a aplicar balances de energía mecánica (véase la Figura 83 con los puntos seleccionados para aplicar los balances), de forma que se pueda calcular un valor teórico aproximado a la carga hidráulica real que deben ser capaces de manejar las bombas en cada uno de los tramos correspondientes. En la Tabla 54 se pueden consultar una descripción y los valores correspondientes a diámetro de conducción, velocidad, altura y presión para cada uno de los puntos seleccionados. La altura se toma teniendo en cuenta que el punto 1 se encuentra a 0 m.

Tabla 54: Descripción y parámetros de los puntos seleccionados en las conducciones hidráulicas para aplicar balances de energía mecánica.

Tramo	Descripción	D (")	v (m/s)	z (m)	p (Pa)
Punto 1	Salida del tanque de homogeneización final del tratamiento primario.	2	0,6	0	$p_{atm} + p_f$
Punto 2	Bifurcación anterior a la operación de adsorción con GAC.	2	0,6 ↑ 0,3 ↓	8,45	p_2
Punto 3	Convergencia posterior a la operación de adsorción con GAC.	2	0,3 ↑ 0,6 ↓	0	p_3
Punto 4	Entrada a la balsa pulmón.	2	0,6	6,02	p_{atm}
Punto 5	Salida de la balsa pulmón.	2	0,6	0	$p_{atm} + p_f$
Punto 6	Entrada al reactor de elevación del pH.	2	0,6	1,78	p_{atm}
Punto 7	Salida del reactor de elevación del pH.	2	0,6	0	$p_{atm} + p_f$
Punto 8	Trifurcación anterior a la operación de adsorción con IGAC.	2 ↑ 1,5 ↓	0,6 ↑ 0,35 ↓	8,45	p_8
Punto 9	Convergencia posterior a la operación de adsorción con IGAC.	1,5 ↑ 2 ↓	0,35 ↑ 0,6 ↓	0	p_9
Punto 10	Entrada al reactor de disminución del pH.	2	0,6	1,78	p_{atm}
Punto 11	Salida del tanque de cloración.	2	0,6	0	$p_{atm} + p_f$
Punto 12	Entrada al tanque final de almacenamiento.	2	0,6	6,02	p_{atm}

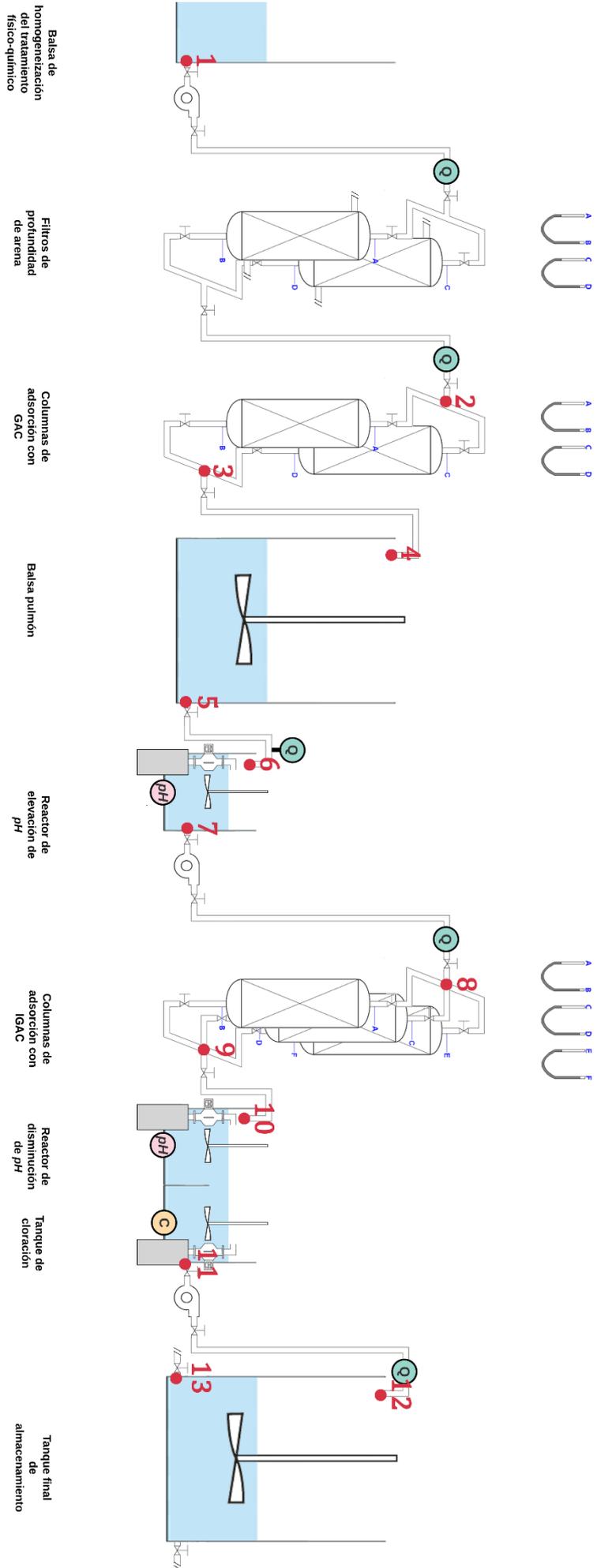


Figura 83: Organización de los puntos en las conducciones hidráulicas en el tratamiento terciario para llevar a cabo balances de energía mecánica (dimensiones no representativas).

Punto 13	Salida del tanque final de almacenamiento (circuito del agua de lavado).	2	0,58	0	$p_{atm} + p_f$
Punto 14	Entrada a la balsa de recepción inicial del tratamiento primario.	2	0,58	7	p_{atm}

Cabe señalar que para calcular la pérdida de energía mecánica provocada por los accidentes se han utilizado las siguientes constantes de la Tabla 55:

Tabla 55: Constantes de los accidentes en las conducciones hidráulicas.
(Rodrigo Carbonell, 2003)

Accidente	k	velocidad	Accidente	k	velocidad
Ensanchamiento	$\left(1 - \frac{D_1^2}{D_2^2}\right)^2$	Medida en el tubo estrecho v_1	Codo de 45° standard	0,35	La del tubo
Estrechamiento	“	“	Codo de 45° gran curvatura	0,20	“
Entradas: Encañonada Cantos vivos Ligeramente redondeada Bien redondeada	0,78 0,50 0,23 0,04	La del tubo	Codo de 90° standard	0,75	“
Salidas: Encañonada Cantos vivos Redondeada	1	“	Codo de 90° gran curvatura	0,45	“
Codo de 90° pequeña curvatura	1,3	La del tubo	Unión roscada	0,04	La del tubo
Codo de 180°	1,5	“	Manguito de unión	0,04	“
T standard: Con bifurcación cerrada Usada como codo Como división del caudal	0,4 1 1	“ “ Corriente principal	Válvula de compuerta: Abierta 3/4 abierta 1/2 abierta 1/4 abierta	0,17 0,90 4,5 24,0	“
Válvula de diafragma: Abierta 3/4 abierta 1/2 abierta 1/4 abierta	2,3 2,6 4,3 21,0	La del tubo	Válvula de asiento: Abierta 3/4 abierta 1/2 abierta 1/4 abierta	9,0 13,0 36,0 112,0	“
Válvula angular abierta	2,0	“	Válvula de mariposa: 5° 10° 20° 40° 60°	0,05 0,29 1,56 17,3 206,0	“

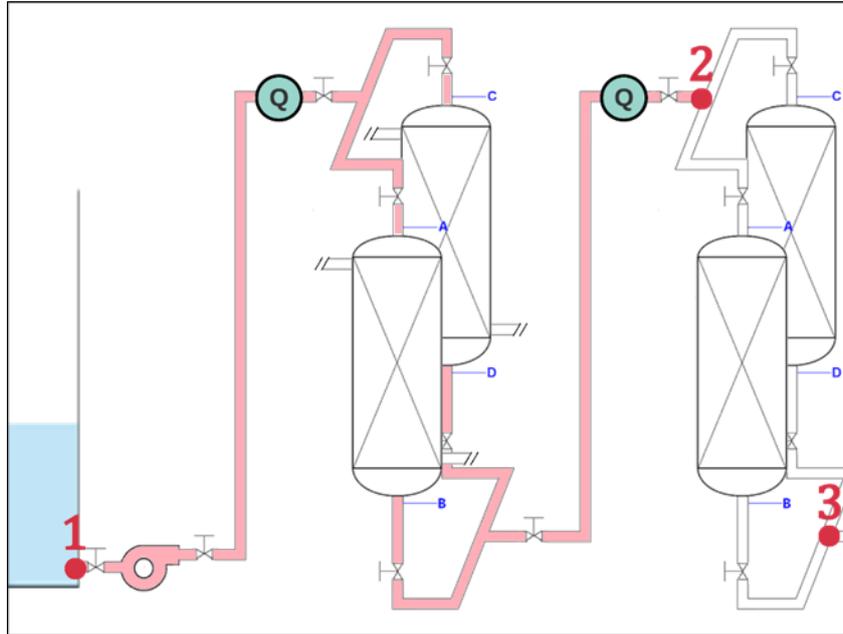
<u>Válvula de retención</u> <u>(abierta):</u>		
De chamela	2,0	
De bola	70,0	“
De disco	10,0	
<u>Válvula de fondo:</u>		
De disco	7,0	
De pistón	15,0	“
Rotatorio	10,0	
De turbina	6,0	

<u>Válvula de bola o macho:</u>		
5°	0,24	
10°	0,52	
20°	1,54	“
40°	10,8	
60°	118,0	

En los cálculos no se realiza la determinación del *NPSH* debido a que no es necesario puesto que todas las bombas trabajan en carga.

Así pues, tomando la ecuación (8) se procede a determinar las necesidades del bombeo del sistema con los balances pertinentes:

- Balance de energía mecánica del punto 1 al 2:



$$h_s = (z_2 - z_1) + \left(\frac{v_2^2}{g \cdot 2 \cdot \alpha_2} - \frac{v_1^2}{g \cdot 2 \cdot \alpha_1} \right) + \frac{(p_2 - p_1)}{g \cdot \rho} + \frac{\Delta F}{g} = \frac{w}{g} = h_B$$

Teniendo en cuenta que, en este caso, $v_2 = v_1$, el balance queda de la siguiente forma:

$$h_s = (z_2 - z_1) + \frac{(p_2 - p_1)}{g \cdot \rho} + \frac{\Delta F}{g}$$

Seguidamente se calcula el módulo de Reynolds (Re) mediante la ecuación (1) para este tramo de conducción:

$$Re = \frac{\rho_f \cdot v \cdot D}{\mu} = \frac{1000 \text{ kg/m}^3 \cdot 0,6 \text{ m/s} \cdot 0,0508 \text{ m}}{0,001 \text{ Pa} \cdot \text{s}} = 30480 > 10000 \quad \text{Turbulento}$$

A continuación, se procede a determinar las pérdidas de energía mecánica (ΔF) causadas por los tramos rectos (ecuación (10)) y los accidentes (ecuación (12)) para disponer de la pérdida de energía total (ecuación (9)):

$$\Delta F = \Delta F_r + \Delta F_a + \Delta F_l$$

$$\Delta F = 2 \cdot f \cdot v^2 \cdot \frac{L_r}{D_{\text{Tubería}}} + K \cdot \frac{v^2}{2} + \Delta F_l$$

A modo de resumen, en la Tabla se pueden ver los valores estimados:

ε (m)	f	L_r (m)	K	ΔF_l (J/kg)
$4,572 \cdot 10^{-5}$ (acero comercial)	$6,417 \cdot 10^{-3}$	50	90	8,184

$$\Delta F = 2 \cdot 6,417 \cdot 10^{-3} \cdot (0,6 \text{ m/s})^2 \cdot \frac{50 \text{ m}}{0,0508 \text{ m}} + 90 \cdot \frac{(0,6 \text{ m/s})^2}{2} + 8,184 \text{ J/kg}$$

$$\Delta F = 4,5475 \text{ J/kg} + 16,2 \text{ J/kg} + 8,184 \text{ J/kg} = 28,932 \text{ J/kg}$$

Una vez determinadas las pérdidas de energía, ya se puede continuar con el balance general:

$$h_s = (z_2 - z_1) + \frac{(p_2 - (p_{atm} + p_f))}{g \cdot \rho} + \frac{\Delta F}{g}$$

$$h_s = (8,45 \text{ m} - 0 \text{ m}) + \frac{(p_2 - (1,013 \cdot 10^5 \text{ Pa} + \rho_f \cdot g \cdot L_f))}{9,8 \text{ m/s}^2 \cdot 1000 \text{ kg/m}^3} + \frac{28,932 \text{ J/kg}}{9,8 \text{ m/s}^2}$$

Se ha considerado que a la salida del tanque de homogeneización final del tratamiento primario la presión (p_1) puede considerarse la atmosférica sumada la causada por el agua almacenada en el tanque (se estiman 6 m).

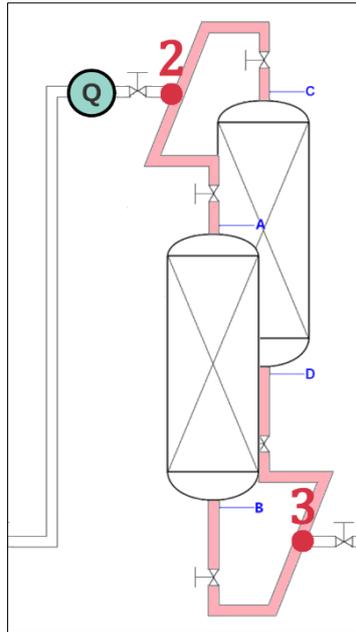
$$h_s = 8,45 \text{ m} + \frac{(p_2 - (1,013 \cdot 10^5 \text{ Pa} + 1000 \text{ kg/m}^3 \cdot 9,8 \text{ m/s}^2 \cdot 6 \text{ m}))}{9,8 \text{ m/s}^2 \cdot 1000 \text{ kg/m}^3} + \frac{28,932 \text{ J/kg}}{9,8 \text{ m/s}^2}$$

$$8,45 \text{ m} + \frac{p_2 - 160100 \text{ Pa}}{9,8 \text{ m/s}^2 \cdot 1000 \text{ kg/m}^3} + 2,952 \text{ m} - h_s = 0$$

$$8,45 \text{ m} + \frac{p_2}{9,8 \text{ m/s}^2 \cdot 1000 \text{ kg/m}^3} - 16,337 \text{ m} + 2,952 \text{ m} - h_s = 0$$

$$\frac{p_2}{9,8 \text{ m/s}^2 \cdot 1000 \text{ kg/m}^3} - 2,952 \text{ m} - h_s = 0$$

- **Balance de energía mecánica del punto 2 al 3:**



$$h_s = (z_3 - z_2) + \left(\frac{v_3^2}{g \cdot 2 \cdot \alpha_3} - \frac{v_2^2}{g \cdot 2 \cdot \alpha_2} \right) + \frac{(p_3 - p_2)}{g \cdot \rho} + \frac{\Delta F}{g} = \frac{w}{g} = h_B$$

Teniendo en cuenta que, en este caso, $v_3 = v_2$ y $h_s = 0$, el balance queda de la siguiente forma:

$$(z_3 - z_2) + \frac{(p_3 - p_2)}{g \cdot \rho} + \frac{\Delta F}{g} = 0$$

Hay que tener en cuenta que, aunque exista una bifurcación, el fluido solo circula por una de las conducciones puesto que solo funciona un filtro al mismo tiempo. Seguidamente se calcula el módulo de Reynolds (Re) mediante la ecuación (1) para este tramo de conducción:

$$Re = \frac{\rho_f \cdot v \cdot D}{\mu} = \frac{1000 \text{ kg/m}^3 \cdot 0,3 \text{ m/s} \cdot 0,0508 \text{ m}}{0,001 \text{ Pa} \cdot \text{s}} = 15240 > 10000 \quad \text{Turbulento}$$

A continuación, se procede a determinar las pérdidas de energía mecánica (ΔF) causadas por los tramos rectos (ecuación (10)) y los accidentes (ecuación (12)) para disponer de la pérdida de energía total (ecuación (9)):

$$\Delta F = \Delta F_r + \Delta F_a + \Delta F_l$$

$$\Delta F = 2 \cdot f \cdot v^2 \cdot \frac{L_r}{D_{Tuberia}} + K \cdot \frac{v^2}{2} + \Delta F_l$$

A modo de resumen, en la Tabla se pueden ver los valores estimados:

ε (m)	f	L_r (m)	K	ΔF_l (J/kg)
$4,572 \cdot 10^{-5}$ (acero comercial)	$7,464 \cdot 10^{-3}$	11,8	50	0,474

$$\Delta F = 2 \cdot 7,464 \cdot 10^{-3} \cdot (0,3 \text{ m/s})^2 \cdot \frac{11,8 \text{ m}}{0,0508 \text{ m}} + 50 \cdot \frac{(0,3 \text{ m/s})^2}{2} + 0,474 \text{ J/kg}$$

$$\Delta F = 0,3121 \text{ J/kg} + 2,25 \text{ J/kg} + 0,474 \text{ J/kg} = 3,036 \text{ J/kg}$$

Una vez determinadas las pérdidas, ya se puede continuar con el balance general:

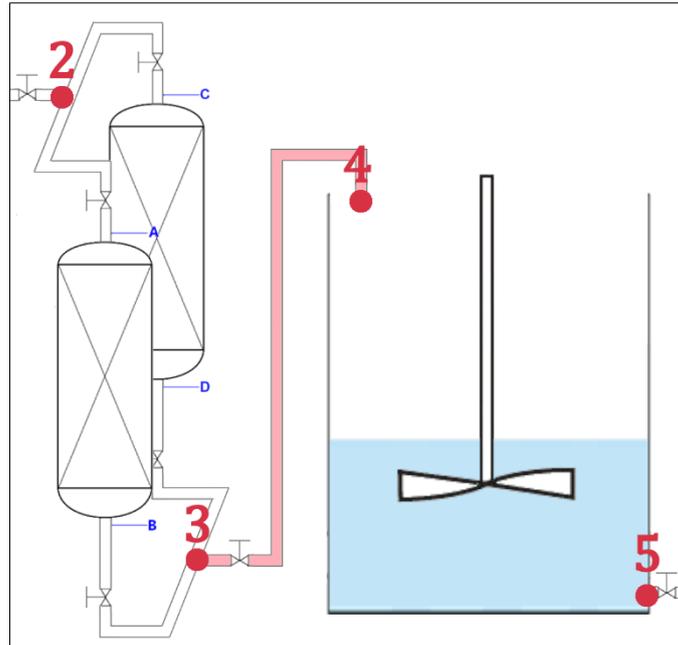
$$(z_3 - z_2) + \frac{(p_3 - p_2)}{g \cdot \rho} + \frac{\Delta F}{g} = 0$$

$$(0 \text{ m} - 8,45 \text{ m}) + \frac{(p_3 - p_2)}{9,8 \text{ m/s}^2 \cdot 1000 \text{ kg/m}^3} + \frac{3,036 \text{ J/kg}}{9,8 \text{ m/s}^2} = 0$$

$$-8,45 \text{ m} + \frac{(p_3 - p_2)}{9,8 \text{ m/s}^2 \cdot 1000 \text{ kg/m}^3} + 0,31 \text{ m} = 0$$

$$\frac{(p_3 - p_2)}{9,8 \text{ m/s}^2 \cdot 1000 \text{ kg/m}^3} - 8,14 \text{ m} = 0$$

- Balance de energía mecánica del punto 3 al 4:



$$h_s = (z_4 - z_3) + \left(\frac{v_4^2}{g \cdot 2 \cdot \alpha_4} - \frac{v_3^2}{g \cdot 2 \cdot \alpha_3} \right) + \frac{(p_4 - p_3)}{g \cdot \rho} + \frac{\Delta F}{g} = \frac{w}{g} = h_B$$

Teniendo en cuenta que, en este caso, $v_3 = v_4$ y $h_s = 0$, el balance queda de la siguiente forma:

$$(z_4 - z_3) + \frac{(p_4 - p_3)}{g \cdot \rho} + \frac{\Delta F}{g} = 0$$

Seguidamente se calcula el módulo de Reynolds (Re) mediante la ecuación (1) para este tramo de conducción:

$$Re = \frac{\rho_f \cdot v \cdot D}{\mu} = \frac{1000 \text{ kg/m}^3 \cdot 0,6 \text{ m/s} \cdot 0,0508 \text{ m}}{0,001 \text{ Pa} \cdot \text{s}} = 30480 > 10000 \quad \text{Turbulento}$$

A continuación, se procede a determinar las pérdidas de energía mecánica (ΔF) causadas por los tramos rectos (ecuación (10)) y los accidentes (ecuación (12)) para disponer de la pérdida de energía total (ecuación (9)):

$$\Delta F = \Delta F_r + \Delta F_a + \Delta F_l$$

$$\Delta F = 2 \cdot f \cdot v^2 \cdot \frac{L_r}{D_{\text{Tuberia}}} + K \cdot \frac{v^2}{2} + \Delta F_l$$

A modo de resumen, en la Tabla se pueden ver los valores estimados:

ε (m)	f	L_r (m)	K	ΔF_l (J/kg)
$4,572 \cdot 10^{-5}$ (acero comercial)	$6,417 \cdot 10^{-3}$	6,72	11,25	—

$$\Delta F = 2 \cdot 6,417 \cdot 10^{-3} \cdot (0,6 \text{ m/s})^2 \cdot \frac{6,72 \text{ m}}{0,0508 \text{ m}} + 11,25 \cdot \frac{(0,6 \text{ m/s})^2}{2}$$

$$\Delta F = 0,6112 \text{ J/kg} + 2,025 \text{ J/kg} = 2,6362 \text{ J/kg}$$

Una vez determinadas las pérdidas, ya se puede continuar con el balance general:

$$(z_4 - z_3) + \frac{(p_{atm} - p_3)}{g \cdot \rho} + \frac{\Delta F}{g} = 0$$

$$(6,02 \text{ m} - 0 \text{ m}) + \frac{(p_{atm} - p_3)}{9,8 \text{ m/s}^2 \cdot 1000 \text{ kg/m}^3} + \frac{2,6362 \text{ J/kg}}{9,8 \text{ m/s}^2} = 0$$

$$6,02 \text{ m} + \frac{1,013 \cdot 10^5 \text{ Pa} - p_3}{9,8 \text{ m/s}^2 \cdot 1000 \text{ kg/m}^3} + \frac{2,6362 \text{ J/kg}}{9,8 \text{ m/s}^2} = 0$$

$$6,02 \text{ m} + 10,337 - \frac{p_3}{9,8 \text{ m/s}^2 \cdot 1000 \text{ kg/m}^3} + 0,269 \text{ m} = 0$$

$$-\frac{p_3}{9,8 \text{ m/s}^2 \cdot 1000 \text{ kg/m}^3} + 16,626 \text{ m} = 0$$

Tomando las ecuaciones resultantes de los 3 balances anteriores y resolviendo el sistema se puede obtener la carga mínima requerida del equipo de bombeo o, lo que es lo mismo, la carga del sistema (h_s):

$$\bullet \text{ BEM (1} \rightarrow \text{2)} \quad \frac{p_2}{9,8 \text{ m/s}^2 \cdot 1000 \text{ kg/m}^3} - 2,952 \text{ m} - h_s = 0$$

$$\bullet \text{ BEM (2} \rightarrow \text{3)} \quad \frac{(p_3 - p_2)}{9,8 \text{ m/s}^2 \cdot 1000 \text{ kg/m}^3} - 8,14 \text{ m} = 0$$

$$\bullet \text{ BEM (3} \rightarrow \text{4)} \quad -\frac{p_3}{9,8 \text{ m/s}^2 \cdot 1000 \text{ kg/m}^3} + 16,626 \text{ m} = 0$$

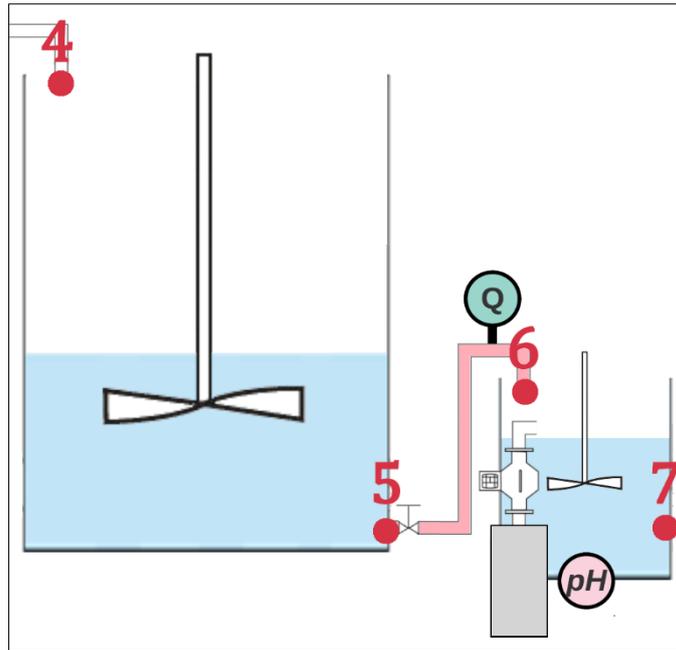
$$\frac{p_2 + p_3 - p_2 - p_3}{9,8 \text{ m/s}^2 \cdot 1000 \text{ kg/m}^3} - 2,952 \text{ m} - 8,14 \text{ m} + 16,626 \text{ m} - h_s = 0$$

$$0 - 2,952 \text{ m} - 8,14 \text{ m} + 16,626 \text{ m} - h_s = 0$$

$$h_s = 5,534 \text{ m}$$

En conclusión, la altura requerida para impulsar $4,4 \text{ m}^3/h$ a través de este tramo es de $5,534 \text{ m}$.

• Balance de energía mecánica del punto 5 al 6:



$$h_s = (z_6 - z_5) + \left(\frac{v_6^2}{g \cdot 2 \cdot \alpha_6} - \frac{v_5^2}{g \cdot 2 \cdot \alpha_5} \right) + \frac{(p_6 - p_5)}{g \cdot \rho} + \frac{\Delta F}{g} = \frac{w}{g} = h_B$$

Teniendo en cuenta que, en este caso, $v_5 = v_6$, el balance queda de la siguiente forma:

$$h_s = (z_6 - z_5) + \frac{(p_6 - p_5)}{g \cdot \rho} + \frac{\Delta F}{g}$$

Seguidamente se calcula el módulo de Reynolds (Re) mediante la ecuación (1) para este tramo de conducción:

$$Re = \frac{\rho_f \cdot v \cdot D}{\mu} = \frac{1000 \text{ kg/m}^3 \cdot 0,6 \text{ m/s} \cdot 0,0508 \text{ m}}{0,001 \text{ Pa} \cdot \text{s}} = 30480 > 10000 \text{ Turbulento}$$

A continuación, se procede a determinar las pérdidas de energía mecánica (ΔF) causadas por los tramos rectos (ecuación (10)) y los accidentes (ecuación (12)) para disponer de la pérdida de energía total (ecuación (9)):

$$\Delta F = \Delta F_r + \Delta F_a + \Delta F_l$$

$$\Delta F = 2 \cdot f \cdot v^2 \cdot \frac{L_r}{D_{\text{Tuberia}}} + K \cdot \frac{v^2}{2} + \Delta F_l$$

A modo de resumen, en la Tabla se pueden ver los valores estimados:

ε (m)	f	L_r (m)	K	ΔF_l (J/kg)
$4,572 \cdot 10^{-5}$ (acero comercial)	$6,417 \cdot 10^{-3}$	2,48	20	—

$$\Delta F = 2 \cdot 6,417 \cdot 10^{-3} \cdot (0,6 \text{ m/s})^2 \cdot \frac{2,48 \text{ m}}{0,0508 \text{ m}} + 20 \cdot \frac{(0,6 \text{ m/s})^2}{2}$$

$$\Delta F = 0,2255 \text{ J/kg} + 3,6 \text{ J/kg} = 3,8255 \text{ J/kg}$$

Una vez determinadas las pérdidas ya se puede obtener la carga del sistema (h_s):

$$h_s = (z_6 - z_5) + \frac{(p_{atm} - (p_{atm} + \rho_f \cdot g \cdot L_f))}{g \cdot \rho} + \frac{\Delta F}{g}$$

Se ha considerado que a la salida de la balsa pulmón la presión (p_5) puede considerarse la atmosférica sumada a la causada por el agua almacenada (se estiman 3 m).

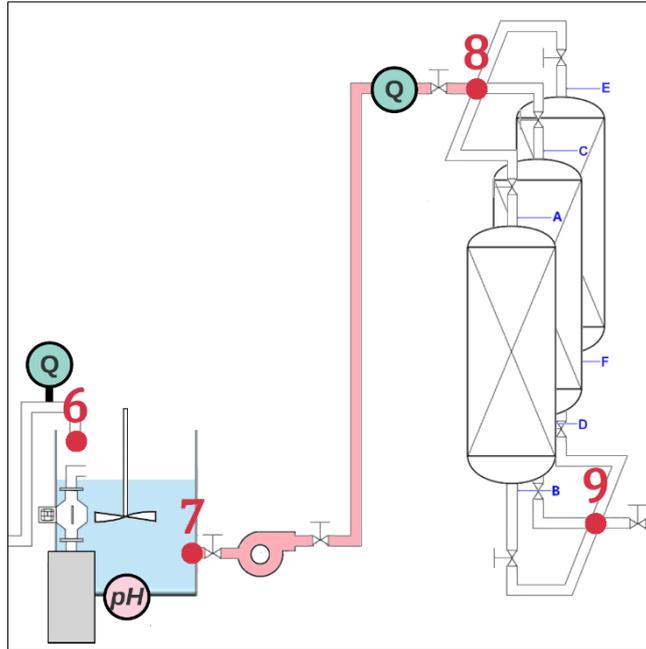
$$h_s = (1,78 \text{ m} - 0 \text{ m}) + \frac{p_{atm} - (p_{atm} + 1000 \text{ kg/m}^3 \cdot 9,8 \text{ m/s}^2 \cdot 3 \text{ m})}{9,8 \text{ m/s}^2 \cdot 1000 \text{ kg/m}^3} + \frac{3,8255 \text{ J/kg}}{9,8 \text{ m/s}^2}$$

$$h_s = 1,78 \text{ m} - 3 \text{ m} + 0,3903 \text{ m}$$

$$h_s = -0,8297 \text{ m}$$

En conclusión, como el resultado es negativo, no es necesario incorporar una bomba para que el agua circule en este tramo. La circulación del agua será a 0,6 m/s siempre que el nivel de agua en la balsa pulmón se mantenga en 2,17 m.

- Balance de energía mecánica del punto 7 al 8:



$$h_s = (z_8 - z_7) + \left(\frac{v_8^2}{g \cdot 2 \cdot \alpha_6} - \frac{v_7^2}{g \cdot 2 \cdot \alpha_5} \right) + \frac{(p_8 - p_7)}{g \cdot \rho} + \frac{\Delta F}{g} = \frac{w}{g} = h_B$$

Teniendo en cuenta que, en este caso, $v_7 = v_8$, el balance queda de la siguiente forma:

$$h_s = (z_8 - z_7) + \frac{(p_8 - p_7)}{g \cdot \rho} + \frac{\Delta F}{g}$$

Seguidamente se calcula el módulo de Reynolds (Re) mediante la ecuación (1) para este tramo de conducción:

$$Re = \frac{\rho_f \cdot v \cdot D}{\mu} = \frac{1000 \text{ kg/m}^3 \cdot 0,6 \text{ m/s} \cdot 0,0508 \text{ m}}{0,001 \text{ Pa} \cdot \text{s}} = 30480 > 10000 \quad \text{Turbulento}$$

A continuación, se procede a determinar las pérdidas de energía mecánica (ΔF) causadas por los tramos rectos (ecuación (10)) y los accidentes (ecuación (12)) para disponer de la pérdida de energía total (ecuación (9)):

$$\Delta F = \Delta F_r + \Delta F_a + \Delta F_l$$

$$\Delta F = 2 \cdot f \cdot v^2 \cdot \frac{L_r}{D_{\text{Tubería}}} + K \cdot \frac{v^2}{2} + \Delta F_l$$

A modo de resumen, en la Tabla se pueden ver los valores estimados:

ε (m)	f	L_r (m)	K	ΔF_l (J/kg)
$4,572 \cdot 10^{-5}$ (acero comercial)	$6,417 \cdot 10^{-3}$	9,05	40	—

$$\Delta F = 2 \cdot 6,417 \cdot 10^{-3} \cdot (0,6 \text{ m/s})^2 \cdot \frac{9,05 \text{ m}}{0,0508 \text{ m}} + 40 \cdot \frac{(0,6 \text{ m/s})^2}{2}$$

$$\Delta F = 0,8231 \text{ J/kg} + 7,2 \text{ J/kg} = 8,0231 \text{ J/kg}$$

Una vez determinadas las pérdidas, ya se puede continuar con el balance general:

$$h_s = (z_8 - z_7) + \frac{(p_8 - (p_{atm} + p_f))}{g \cdot \rho} + \frac{\Delta F}{g}$$

$$h_s = (8,45 \text{ m} - 0 \text{ m}) + \frac{(p_8 - (p_{atm} + \rho_f \cdot g \cdot L_f))}{9,8 \text{ m/s}^2 \cdot 1000 \text{ kg/m}^3} + \frac{8,0231 \text{ J/kg}}{9,8 \text{ m/s}^2}$$

Se ha considerado que a la salida del reactor de elevación de pH la presión (p_7) puede considerarse la atmosférica sumada a la causada por el agua almacenada (se estiman 1,78 m).

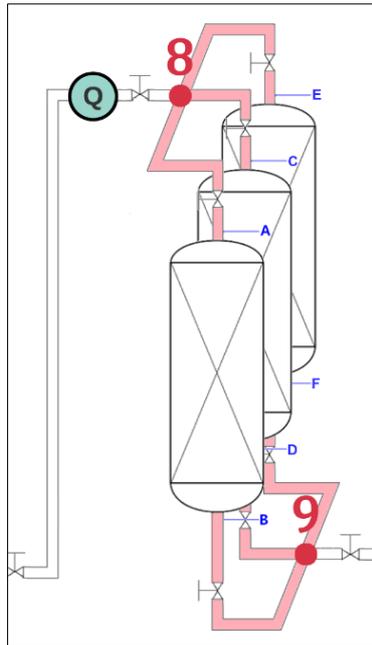
$$h_s = 8,45 \text{ m} + \frac{p_8 - (1,013 \cdot 10^5 \text{ Pa} + 1000 \text{ kg/m}^3 \cdot 9,8 \text{ m/s}^2 \cdot 1,78 \text{ m})}{9,8 \text{ m/s}^2 \cdot 1000 \text{ kg/m}^3} + \frac{8,0231 \text{ J/kg}}{9,8 \text{ m/s}^2}$$

$$8,45 \text{ m} + \frac{p_8 - 118744 \text{ Pa}}{9,8 \text{ m/s}^2 \cdot 1000 \text{ kg/m}^3} + 0,819 \text{ m} - h_s = 0$$

$$8,45 \text{ m} + \frac{p_8}{9,8 \text{ m/s}^2 \cdot 1000 \text{ kg/m}^3} - 12,117 \text{ m} + 0,819 \text{ m} - h_s = 0$$

$$\frac{p_8}{9,8 \text{ m/s}^2 \cdot 1000 \text{ kg/m}^3} - 2,848 \text{ m} - h_s = 0$$

- Balance de energía mecánica del punto 8 al 9:



$$h_s = (z_9 - z_8) + \left(\frac{v_9^2}{g \cdot 2 \cdot \alpha_3} - \frac{v_8^2}{g \cdot 2 \cdot \alpha_2} \right) + \frac{(p_9 - p_8)}{g \cdot \rho} + \frac{\Delta F}{g} = \frac{w}{g} = h_B$$

Teniendo en cuenta que, en este caso, $v_8 = v_9$ y $h_s = 0$, el balance queda de la siguiente forma:

$$(z_9 - z_8) + \frac{(p_9 - p_8)}{g \cdot \rho} + \frac{\Delta F}{g} = 0$$

Seguidamente se calcula el módulo de Reynolds (Re) mediante la ecuación (1) para este tramo de conducción:

$$Re = \frac{\rho_f \cdot v \cdot D}{\mu} = \frac{1000 \text{ kg/m}^3 \cdot 0,35 \text{ m/s} \cdot 0,0381 \text{ m}}{0,001 \text{ Pa} \cdot \text{s}} = 13335 > 10000 \quad \text{Turbulento}$$

A continuación, se procede a determinar las pérdidas de energía mecánica (ΔF) causadas por los tramos rectos (ecuación (10)) y los accidentes (ecuación (12)) para disponer de la pérdida de energía total (ecuación (9)):

$$\Delta F = \Delta F_r + \Delta F_a + \Delta F_l$$

$$\Delta F = 2 \cdot f \cdot v^2 \cdot \frac{L_r}{D_{\text{Tubería}}} + K \cdot \frac{v^2}{2} + \Delta F_l$$

A modo de resumen, en la Tabla se pueden ver los valores estimados:

ε (m)	f	L_r (m)	K	ΔF_l (J/kg)
$4,572 \cdot 10^{-5}$ (acero comercial)	$7,672 \cdot 10^{-3}$	11,8	50	0,316

$$\Delta F = 2 \cdot 7,672 \cdot 10^{-3} \cdot (0,35 \text{ m/s})^2 \cdot \frac{11,8 \text{ m}}{0,0381 \text{ m}} + 50 \cdot \frac{(0,35 \text{ m/s})^2}{2} + 0,316 \text{ J/kg}$$

$$\Delta F = 0,5821 \text{ J/kg} + 3,0625 \text{ J/kg} + 0,316 \text{ J/kg} = 3,961 \text{ J/kg}$$

Una vez determinadas las pérdidas, ya se puede continuar con el balance general:

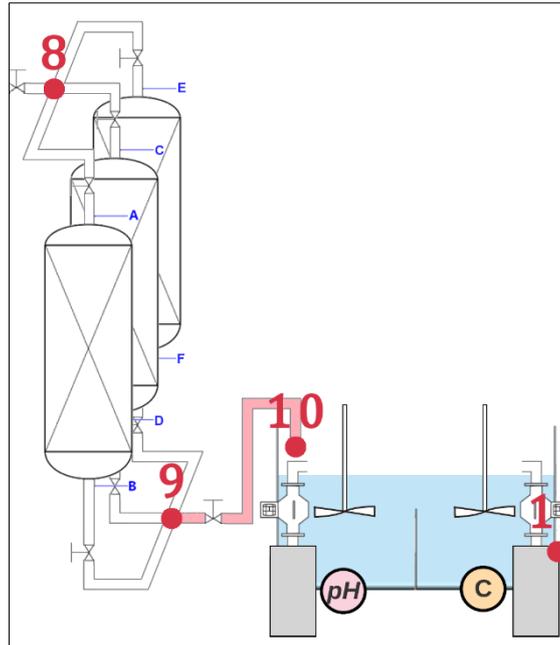
$$(z_9 - z_8) + \frac{(p_9 - p_8)}{g \cdot \rho} + \frac{\Delta F}{g} = 0$$

$$(0 \text{ m} - 8,45 \text{ m}) + \frac{(p_9 - p_8)}{9,8 \text{ m/s}^2 \cdot 1000 \text{ kg/m}^3} + \frac{3,961 \text{ J/kg}}{9,8 \text{ m/s}^2} = 0$$

$$-8,45 \text{ m} + \frac{(p_9 - p_8)}{9,8 \text{ m/s}^2 \cdot 1000 \text{ kg/m}^3} + 0,404 \text{ m} = 0$$

$$\frac{(p_9 - p_8)}{9,8 \text{ m/s}^2 \cdot 1000 \text{ kg/m}^3} - 8,046 \text{ m} = 0$$

- **Balance de energía mecánica del punto 9 al 10:**



$$h_s = (z_{10} - z_9) + \left(\frac{v_{10}^2}{g \cdot 2 \cdot \alpha_4} - \frac{v_9^2}{g \cdot 2 \cdot \alpha_3} \right) + \frac{(p_{10} - p_9)}{g \cdot \rho} + \frac{\Delta F}{g} = \frac{w}{g} = h_B$$

Teniendo en cuenta que, en este caso, $v_9 = v_{10}$ y $h_s = 0$, el balance queda de la siguiente forma:

$$(z_{10} - z_9) + \frac{(p_{10} - p_9)}{g \cdot \rho} + \frac{\Delta F}{g} = 0$$

Seguidamente se calcula el módulo de Reynolds (Re) mediante la ecuación (1) para este tramo de conducción:

$$Re = \frac{\rho_f \cdot v \cdot D}{\mu} = \frac{1000 \text{ kg/m}^3 \cdot 0,6 \text{ m/s} \cdot 0,0508 \text{ m}}{0,001 \text{ Pa} \cdot \text{s}} = 30480 > 10000 \quad \text{Turbulento}$$

A continuación, se procede a determinar las pérdidas de energía mecánica (ΔF) causadas por los tramos rectos (ecuación (10)) y los accidentes (ecuación (12)) para disponer de la pérdida de energía total (ecuación (9)):

$$\Delta F = \Delta F_r + \Delta F_a + \Delta F_l$$

$$\Delta F = 2 \cdot f \cdot v^2 \cdot \frac{L_r}{D_{\text{Tubería}}} + K \cdot \frac{v^2}{2} + \Delta F_l$$

A modo de resumen, en la Tabla se pueden ver los valores estimados:

ε (m)	f	L_r (m)	K	ΔF_l (J/kg)
$4,572 \cdot 10^{-5}$ (acero comercial)	$6,417 \cdot 10^{-3}$	2,48	11,25	—

$$\Delta F = 2 \cdot 6,417 \cdot 10^{-3} \cdot (0,6 \text{ m/s})^2 \cdot \frac{2,48 \text{ m}}{0,0508 \text{ m}} + 11,25 \cdot \frac{(0,6 \text{ m/s})^2}{2}$$

$$\Delta F = 0,2255 \text{ J/kg} + 2,025 \text{ J/kg} = 2,2505 \text{ J/kg}$$

Una vez determinadas las pérdidas, ya se puede continuar con el balance general:

$$(z_{10} - z_9) + \frac{(p_{atm} - p_9)}{g \cdot \rho} + \frac{\Delta F}{g} = 0$$

$$(1,78 \text{ m} - 0 \text{ m}) + \frac{(p_{atm} - p_9)}{9,8 \text{ m/s}^2 \cdot 1000 \text{ kg/m}^3} + \frac{2,2505 \text{ J/kg}}{9,8 \text{ m/s}^2} = 0$$

$$1,78 \text{ m} + \frac{1,013 \cdot 10^5 \text{ Pa} - p_9}{9,8 \text{ m/s}^2 \cdot 1000 \text{ kg/m}^3} + \frac{2,2505 \text{ J/kg}}{9,8 \text{ m/s}^2} = 0$$

$$1,78 \text{ m} + 10,337 - \frac{p_9}{9,8 \text{ m/s}^2 \cdot 1000 \text{ kg/m}^3} + 0,23 \text{ m} = 0$$

$$-\frac{p_9}{9,8 \text{ m/s}^2 \cdot 1000 \text{ kg/m}^3} + 12,347 \text{ m} = 0$$

Tomando las ecuaciones resultantes de los 3 balances anteriores y resolviendo el sistema se puede obtener la carga mínima requerida del equipo de bombeo o, lo que es lo mismo, la carga del sistema (h_s):

$$\bullet \text{ BEM (7} \rightarrow \text{8)} \quad \frac{p_8}{9,8 \text{ m/s}^2 \cdot 1000 \text{ kg/m}^3} - 2,848 \text{ m} - h_s = 0$$

$$\bullet \text{ BEM (8} \rightarrow \text{9)} \quad \frac{(p_9 - p_8)}{9,8 \text{ m/s}^2 \cdot 1000 \text{ kg/m}^3} - 8,046 \text{ m} = 0$$

$$\bullet \text{ BEM (9} \rightarrow \text{10)} \quad -\frac{p_9}{9,8 \text{ m/s}^2 \cdot 1000 \text{ kg/m}^3} + 12,347 \text{ m} = 0$$

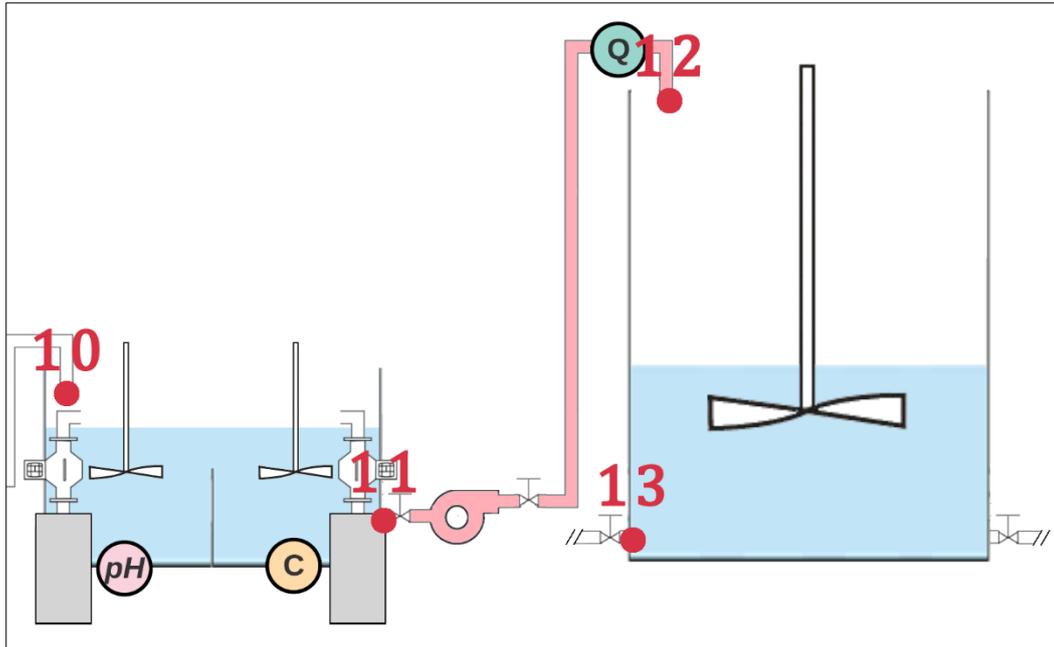
$$\frac{p_8 + p_9 + p_9 - p_8}{9,8 \text{ m/s}^2 \cdot 1000 \text{ kg/m}^3} - 2,848 \text{ m} - 8,046 \text{ m} + 12,347 \text{ m} - h_s = 0$$

$$0 - 2,848 \text{ m} - 8,046 \text{ m} + 12,347 \text{ m} - h_s = 0$$

$$h_s = 1,453 \text{ m}$$

En conclusión, la altura requerida para impulsar $4,4 \text{ m}^3/h$ a través de este tramo es de $1,453 \text{ m}$

• Balance de energía mecánica del punto 11 al 12:



$$h_s = (z_{12} - z_{11}) + \left(\frac{v_{12}^2}{g \cdot 2 \cdot \alpha_{11}} - \frac{v_{11}^2}{g \cdot 2 \cdot \alpha_{10}} \right) + \frac{(p_{12} - p_{11})}{g \cdot \rho} + \frac{\Delta F}{g} = \frac{w}{g} = h_B$$

Teniendo en cuenta que, en este caso, $v_{11} = v_{12}$, el balance queda de la siguiente forma:

$$h_s = (z_{12} - z_{11}) + \frac{(p_{12} - p_{11})}{g \cdot \rho} + \frac{\Delta F}{g}$$

Seguidamente se calcula el módulo de Reynolds (Re) mediante la ecuación (1) para este tramo de conducción:

$$Re = \frac{\rho_f \cdot v \cdot D}{\mu} = \frac{1000 \text{ kg/m}^3 \cdot 0,6 \text{ m/s} \cdot 0,0508 \text{ m}}{0,001 \text{ Pa} \cdot \text{s}} = 30480 > 10000 \quad \text{Turbulento}$$

A continuación, se procede a determinar las pérdidas de energía mecánica (ΔF) causadas por los tramos rectos (ecuación (10)) y los accidentes (ecuación (12)) para disponer de la pérdida de energía total (ecuación (9)):

$$\Delta F = \Delta F_r + \Delta F_a + \Delta F_l$$

$$\Delta F = 2 \cdot f \cdot v^2 \cdot \frac{L_r}{D_{\text{Tubería}}} + K \cdot \frac{v^2}{2} + \Delta F_l$$

A modo de resumen, en la Tabla se pueden ver los valores estimados:

ε (m)	f	L_r (m)	K	ΔF_l (J/kg)
$4,572 \cdot 10^{-5}$ (acero comercial)	$6,417 \cdot 10^{-3}$	6,72	30	—

$$\Delta F = 2 \cdot 6,417 \cdot 10^{-3} \cdot (0,6 \text{ m/s})^2 \cdot \frac{6,72 \text{ m}}{0,0508 \text{ m}} + 30 \cdot \frac{(0,6 \text{ m/s})^2}{2}$$

$$\Delta F = 0,6112 \text{ J/kg} + 5,4 \text{ J/kg} = 6,0112 \text{ J/kg}$$

Una vez determinadas las pérdidas ya se puede obtener la carga del sistema (h_s):

$$h_s = (z_{12} - z_{11}) + \frac{(p_{atm} - p_f)}{g \cdot \rho} + \frac{\Delta F}{g}$$

$$h_s = (z_{12} - z_{11}) + \frac{(p_{atm} - (p_{atm} + \rho_f \cdot g \cdot L_f))}{g \cdot \rho} + \frac{\Delta F}{g}$$

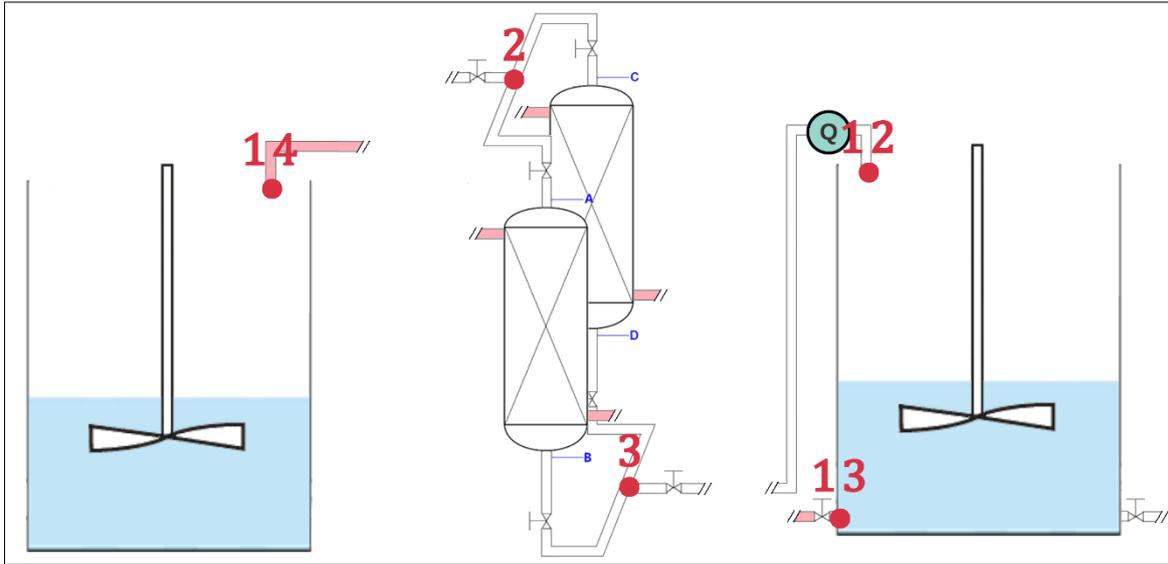
Se ha considerado que a la salida del tanque de cloración la presión (p_{11}) puede considerarse la atmosférica sumada a la causada por el agua almacenada (se estiman 1,78 m).

$$h_s = (6,02 \text{ m} - 0 \text{ m}) - \frac{1000 \text{ kg/m}^3 \cdot 9,8 \text{ m/s}^2 \cdot 1,78 \text{ m}}{9,8 \text{ m/s}^2 \cdot 1000 \text{ kg/m}^3} + \frac{6,0112 \text{ J/kg}}{9,8 \text{ m/s}^2}$$

$$h_s = 6,02 \text{ m} - 1,78 \text{ m} + 0,6134 = 8,4134 \text{ m}$$

En conclusión, los requisitos de la bomba para este tramo son la impulsión de $4,4 \text{ m}^3/h$ a una altura de $8,4134 \text{ m}$.

- **Balance de energía mecánica del punto 13 al 14:**



$$h_s = (z_{14} - z_{13}) + \left(\frac{v_{14}^2}{g \cdot 2 \cdot \alpha_{12}} - \frac{v_{13}^2}{g \cdot 2 \cdot \alpha_{12}} \right) + \frac{(p_{14} - p_{13})}{g \cdot \rho} + \frac{\Delta F}{g} = \frac{w}{g} = h_B$$

Teniendo en cuenta que, en este caso, $v_{13} = v_{12}$, el balance queda de la siguiente forma:

$$h_s = (z_{14} - z_{13}) + \frac{(p_{14} - p_{13})}{g \cdot \rho} + \frac{\Delta F}{g}$$

Seguidamente se calcula el módulo de Reynolds (Re) mediante la ecuación (1) para este tramo de conducción:

$$Re = \frac{\rho_f \cdot v \cdot D}{\mu} = \frac{1000 \text{ kg/m}^3 \cdot 0,58 \text{ m/s} \cdot 0,0508 \text{ m}}{0,001 \text{ Pa} \cdot \text{s}} = 29464 > 10000 \quad \text{Turbulento}$$

A continuación, se procede a determinar las pérdidas de energía mecánica (ΔF) causadas por los tramos rectos (ecuación (10)) y los accidentes (ecuación (12)) para disponer de la pérdida de energía total (ecuación (9)):

$$\Delta F = \Delta F_r + \Delta F_a + \Delta F_l$$

$$\Delta F = 2 \cdot f \cdot v^2 \cdot \frac{L_r}{D_{\text{Tubería}}} + K \cdot \frac{v^2}{2} + \Delta F_l$$

A modo de resumen, en la Tabla se pueden ver los valores estimados:

ε (m)	f	L_r (m)	K	ΔF_l (J/kg)
$4,572 \cdot 10^{-5}$ (acero comercial)	$6,455 \cdot 10^{-3}$	104	40	7,601

$$\Delta F = 2 \cdot 6,455 \cdot 10^{-3} \cdot (0,58 \text{ m/s})^2 \cdot \frac{104 \text{ m}}{0,0508 \text{ m}} + 40 \cdot \frac{(0,58 \text{ m/s})^2}{2} + 7,601 \text{ J/kg}$$

$$\Delta F = 8,891 \text{ J/kg} + 6,728 \text{ J/kg} + 7,601 \text{ J/kg} = 23,22 \text{ J/kg}$$

Una vez determinadas las pérdidas ya se puede obtener la carga del sistema (h_s):

$$h_s = (z_{14} - z_{13}) + \frac{(p_{atm} - p_f)}{g \cdot \rho} + \frac{\Delta F}{g}$$

$$h_s = (7 \text{ m} - 0 \text{ m}) + \frac{(p_{atm} - (p_{atm} + \rho_f \cdot g \cdot L_f))}{9,8 \text{ m/s}^2 \cdot 1000 \text{ kg/m}^3} + \frac{23,22 \text{ J/kg}}{9,8 \text{ m/s}^2}$$

Se ha considerado que en la salida del tanque final de almacenamiento la presión (p_{13}) es atmosférica sumada a la causada por el agua almacenada en el tanque (se estiman 6 m).

$$h_s = 7 \text{ m} + \frac{1000 \text{ kg/m}^3 \cdot 9,8 \text{ m/s}^2 \cdot 6 \text{ m}}{9,8 \text{ m/s}^2 \cdot 1000 \text{ kg/m}^3} + 2,369 \text{ m}$$

$$h_s = 7 \text{ m} - 6 \text{ m} + 2,369 \text{ m} = 3,369 \text{ m}$$

En conclusión, los requisitos de la bomba para este tramo son la impulsión de $0,803 \text{ m}^3/\text{h}$ a una altura de $3,369 \text{ m}$.

Así, los requisitos del equipo de bombeo quedan determinados. En la Tabla 56 se pueden consultar estos requisitos para cada una de las bombas, así como las bombas seleccionadas para llevar a cabo la tarea de impulsión. Se ha especificado el tramo que ocupan las bombas según la distinción hecha en la Figura 82.

Tabla 56: Requisitos de los equipos de bombeo.

Bomba	Tramo	$h_{B\ min} (m)$	$Q_v (m^3/h)$	Bomba seleccionada
1	1	5,534	4,4	Prisma 15 2 (60 hz)
2	12	1,453	4,4	Prisma 15 1 (60 hz)
3	18	8,4134	4,4	Drain 100 (50 hz)
4	4	3,369	4,232	Prisma 15 2 (60 hz)
5	Recirculación en el tanque de cloración	< 1	2,2	Tecno 5 3 (50 hz)

4. Catálogos comerciales

A continuación, se presentan extractos de catálogos comerciales correspondientes a los equipos incorporados al tratamiento:

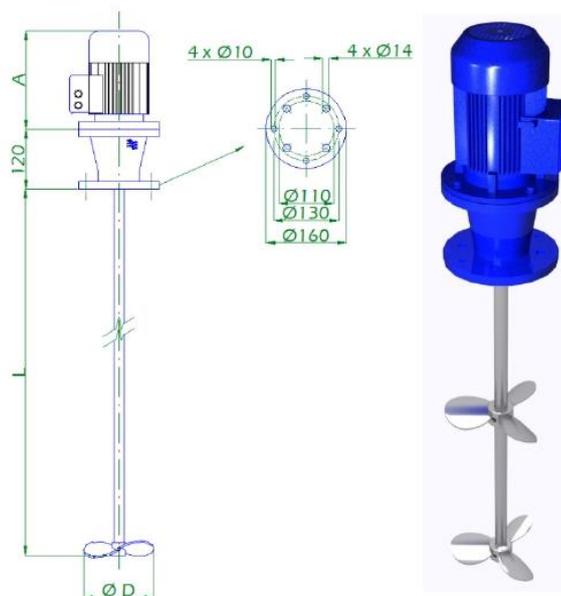
Los VHD3 son agitadores rápidos, disponibles en tres velocidades: 750, 1000, 1500 rpm y adecuados para depósitos pequeños y medianos con volúmenes de 200 a 3000 litros. El móvil estándar es una hélice marina de tres palas. Una linterna de aluminio con un eje interior guiado por un rodamiento absorbe los esfuerzos radiales y permite alcanzar longitudes de eje de hasta 1500 mm. En caso necesario, la hélice se puede ajustar fácilmente a lo largo del eje, o se puede equipar con dos o más hélices.

Características:

- Para tanques de 200 – 3000 litros.
- Motores de 0,18 kW a 1,5 kW.
- Velocidad 750, 1000, 1500 rpm.
- Hélice marina tripala de diámetros entre 128 y 200 mm.
- Diámetro de eje 20 mm, longitud máxima 1500 mm.
- Eje y hélice en AISI 316, o revestido de polietileno.
- Brida con 2 opciones de montaje, círculo de taladros Ø 110 y 130 mm.

Extras opcionales:

- Brida en AISI 316 o PVC con retén.
- Revestimientos especiales.
- Ejecución alimentaria o pulida.
- Motores ATEX..
- Bridas DIN o ANSI.
- Sujeción por pinza.



ATENCIÓN: ¡No deben trabajar en tanques vacíos!

Modelo	Motor kW	rpm	A	D	L max.	kg	Vol. m ³
VHD3-01 02 B 01	0,18	1000	224	100	1500	17	0,2 – 0,5
VHD3-03 03 B 02	0,37	1500	224	128	1500	17	0,5 – 1
VHD3-05 03 B 03	0,75	1500	242	140	1500	20	1 – 1,5
VHD3-06 03 B 04	1,1	1500	279	160	1500	21	1 – 2
VHD3-07 03 B 05	1,5	1500	279	200	1500	26	2 – 3

Dimensiones en [mm].

(*) Volúmenes orientativos de tanques.

Debido a nuestra política de constante mejora, los valores indicados pueden cambiar.

Tineo, 17 ■ 28031 Madrid (Spain) ■ Tel: + 34 91 170.19.24 ■ sales@fluidmix.es



VPS3 SERIES

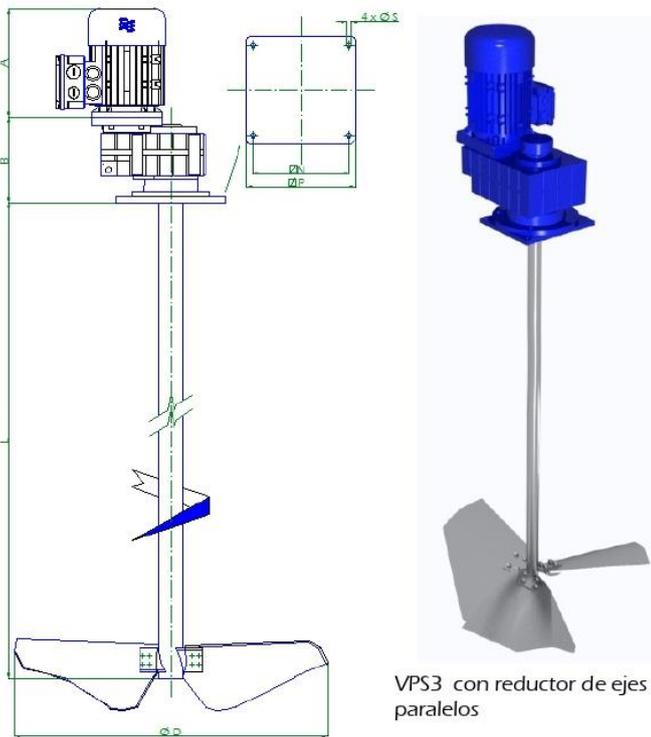
Los agitadores VPS3 tienen perfil axial de tres palas tipo S. Este perfil ofrece un gran volumen de bombeo con baja potencia absorbida. Son adecuados para grandes depósitos y pueden equiparse opcionalmente con una linterna y cualquier tipo de estanqueidad, como prensaestopas, cierre mecánico seco, o refrigerado, laberinto hidráulico. Los agitadores VPS se fabrican a medida, y cada uno de ellos es estudiado y diseñado para su aplicación específica. Los reductores pueden ser tipo de engranajes helicoidales, o ejes paralelos. Con más de 6 metros de eje, éste se fabrica en dos o más piezas. Los agitadores VPS pueden tener dos o más hélices en el eje. El caudal de bombeo puede ser en sentido impulsante o aspirante

Características:

- Para grandes depósitos.
- Potencia motor: 0,55 kW hasta 45 kW.
- Velocidad de marcha de 30 a 150 rpm.
- 3 palas axiales de perfil a tipo S, diámetros 800 a 4000 mm.
- Largo del eje hasta 12000 mm.
- Eje y hélice en AISI 316, AISI 304, acero, al carbono, aleación especiales, ebonitado.

Extras Opcionales:

- Placa de anclaje en AISI 316 con retén.
- Ejecución alimentaria, pulido
- Motores ATEX.
- Bridas DIN o ANSI.
- Linterna con sellado: prensaestopas, sello mecánico, hidráulico laberinto.
- Placa de fijación refrigerada.



VPS3 con reductor de ejes paralelos

Modelo	Motor kW	rpm	A	B	C	D	L	N	P	S	Peso Kg
VPS3-											
VPS3-	Datos correspondientes a la aplicación específica requerida.										

Dimensiones en [mm].

Debido a nuestra política de constante mejora, los valores indicados pueden cambiar.

Tineo, 17 ■ 28031 Madrid (Spain) ■ Tel: + 34 91 170.19.24 ■ sales@fluidmix.es

Descripción General

MEMDOS DX Series es una línea económica de bombas dosificadoras de diafragma mecánicas accionadas a motor. Esta línea versátil ofrece dos versiones para realizar una amplia variedad de aplicaciones. Las bombas inteligentes MEMDOS DX ofrecen un control por microprocesador de última generación. Al integrar el control de velocidad, las bombas de la serie MEMDOS DX eliminan la necesidad de realizar mayores gastos en controladores de velocidad variables adicionales.

Los mecanismos de alta calidad, combinados con la fiabilidad comprobada de los expertos responsables de MEMDOS DX series, le otorgan tecnología de avanzada a la industria de las bombas dosificadoras.

Existen dos tamaños de chasis dentro de la familia MEMDOS DX. El tamaño más pequeño es para capacidades de hasta 42 gph. El tamaño más grande es para capacidades de hasta 92 gph. Se encuentran disponibles rangos de presión para 150 psi, dependiendo de la capacidad de la bomba. Las válvulas de control son de doble bola o poseen un diseño de doble bola accionado por resortes.

MEMDOS DX

Flexibilidad en las aplicaciones

- La relación de reducción de hasta 1400:1 brinda más precisión en el proceso de control
- Control automático o manual
- El recinto NEMA 4X protege los elementos electrónicos de ambientes nocivos

Control del microprocesador

- El control de velocidad integrado permite la selección de varias señales de control:
 - Control de contacto/pulso
 - Capacidad de multiplicación/división
 - control analógico... 4-20 mA, 0-20 mA
- Capacidad de arranque/detención remota
- Monitoreo de señal de entrada y alarmas de salida

Fácil de usar

- Teclado táctil y pantalla LCD
- Sistema de auto-diagnóstico para el monitoreo de procesos de alimentación químicos. Mensajes visualizados para niveles bajos del tanque o pérdida de señal analógica.



Opciones

- Lado líquido de doble diafragma
- Detección de fuga
- Indicación y alarma de bajo nivel de tanque

Materiales de Construcción

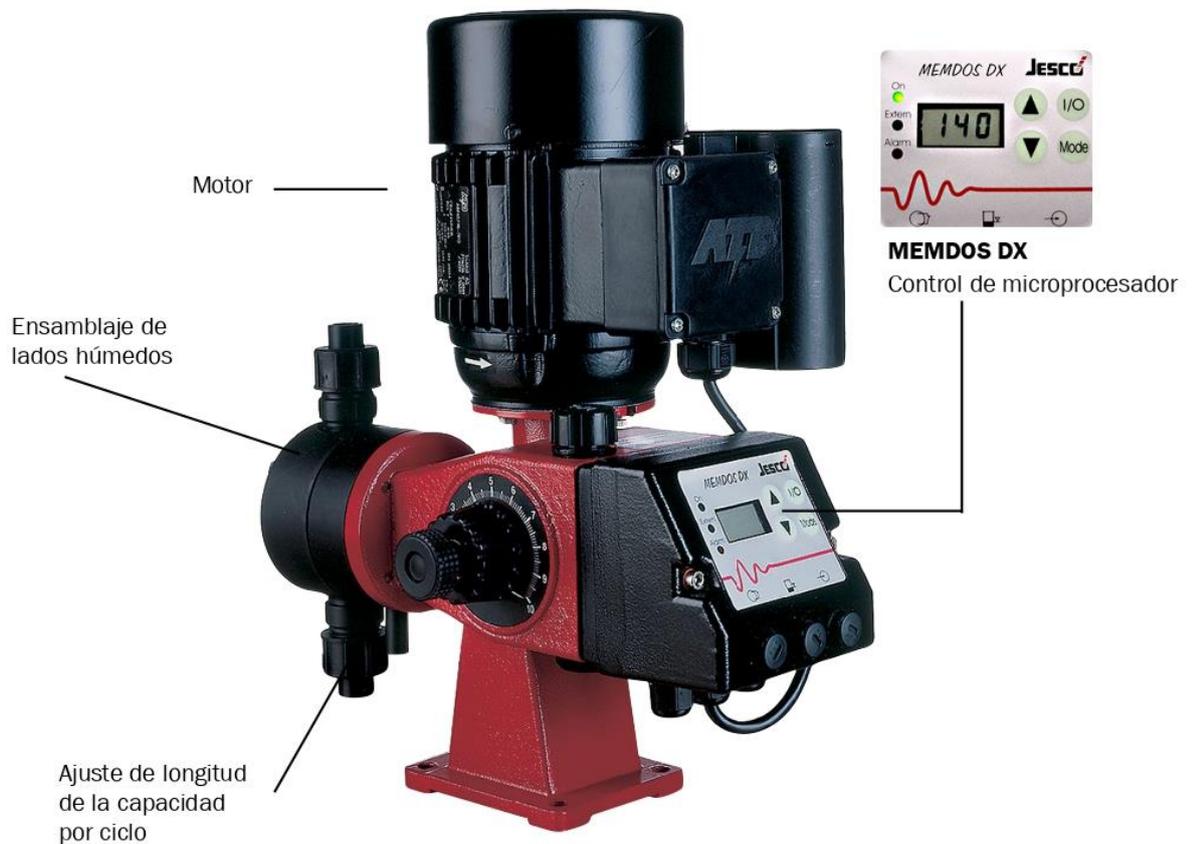
Lados líquidos de polipropileno, PVC, PVDF y 316 Acero Inoxidable. Los diafragmas son de PTFE recubiertos con EPDM. Se encuentran disponibles en Seals of Viton™, Hypalon™ o PTFE.



Bombas Dosificadoras Mecánicas - MEMDOS DX

Información Técnica

Tamaño del chasis		4 - 156								160 - 300		
Modelo		4	8	15	26	50	76	110	156	160	200	300
Capacidad	gph	1.2	2.3	4.7	6	15.2	19	33.8	42.2	49	66	92
Capacidad	l/h	4.7	8.7	17.7	22.7	57.5	71.9	127.9	159.7	185.4	249	348
Presión máxima	psig	150						75	60	150		125
Capacidad/ciclo	ml	2.6			8.5			19		36.5		51.2
Frecuencia del ciclo	SPM	32	58	114	140	114	140	114	140	85	114	114
Diámetro del diafragma	pulg	2.04			2.51			3.54		4.72		5.9
Elevación de succión	pies H ₂ O	13			11			10		8		
Longitud del ciclo	in.	0.2			0.35			0.393				
Motor - 1-fase	Hp	1/6						1/3				
Temperatura ambiente máxima	°F	PVC & Polypro: 104°; PVDF: 120°; 316S: 140°										
Relación de transmisión		55:1	30:1	15:1	12:1	15:1	12:1	15:1	12:1	20:1	15:1	15:1



Drain 100 Drenaje



Bomba sumergible para aguas residuales

Aplicaciones

Evacuación, trasvase y vaciado de aguas residuales.

Materiales

Cuerpo bomba en AISI 304.
Eje bomba en AISI 420.
Impulsor en tecnopolímero.
Aspiración e impulsión en fundición.
Doble cierre mecánico en alúmina-grafito.
Juntas en NBR/EPDM.

Motor

Asíncrono 2 polos.
Protección IP68.
Servicio continuo.
Aislamiento clase F.
Protección térmica incorporada.

Limitaciones

Temperatura máxima del agua: 40°C.
Paso máximo de sólidos: Ø 7mm.
Inmersión máxima: 7m.

Equipamiento

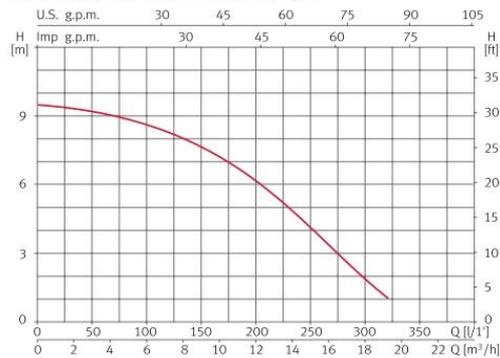
Interruptor de nivel y 10m de cable con enchufe tipo F.
Condensador externo con caja condensador incluida.



Tabla de funcionamiento hidráulico

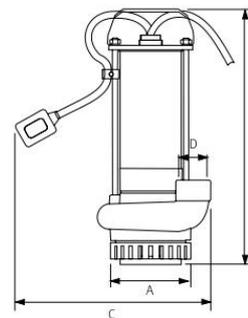
Modelo	I [A]	P1 [kW]	P2		c [µF]	l/min	25	50	100	150	200	250	300	320	Código
	1~230V	1~	[kW]	[HP]		m ³ /h	1,5	3,0	6,0	9,0	12	15	18	19,2	
Drain 100	3,1	0,9	0,75	1	12	mca	9,2	9,1	8,7	7,8	6	4	2	1	96601

Curva de funcionamiento a 2900 rpm



Dimensión y peso

Modelo	A	B	C	D	Kg
Drain 100	122	392	300	114*	10,5



Prisma 15 Superficie horizontal



Bomba centrífuga multietapa para el suministro de agua

Aplicaciones

Bombeo de aguas limpias para uso doméstico, industrial, agrícola y jardinería.
Silenciosa.
Autoaspirante hasta 2m.

Motor

Asíncrono 2 polos.
Protección IPX5.
Aislamiento clase F.
Versión monofásica con protección térmica incorporada.
Servicio continuo.

Materiales

Cuerpo bomba e impulsores en AISI 304.
Eje bomba en AISI 431.
Difusores en tecnopolímero.
Aspiración e impulsión en fundición con tratamiento cataforesis.
Cierre mecánico en alúmina-grafito.
Carcasa motor en aluminio.
Juntas en NBR/EPDM.

Limitaciones

Temperatura máxima del agua: 40°C.

Equipamiento

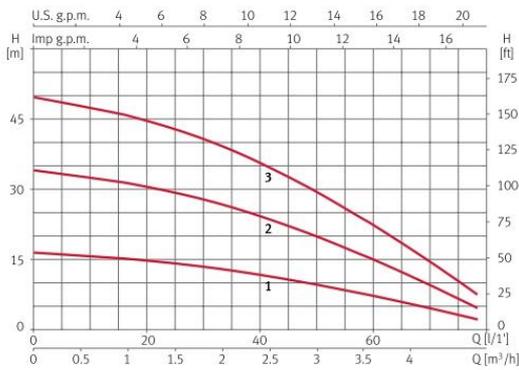
Sin cable.



Tabla de funcionamiento hidráulico

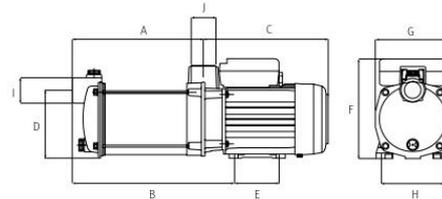
Modelo	I [A]				P1 [kW]		P2		c [µF]	l/min	20	30	50	60	70	Código		
	1-115V	1-220V	3-220V	3-380V	1~	3~	[kW]	[HP]								1-115V	1-220V	3-220V/380V
Prisma 15 1	4,4	2	1,3	0,8	0,4	0,4	0,24	0,33	30/12	m³/h	1,2	1,8	3	3,6	4,2	99032	97129	97128
Prisma 15 2	5,8	3,2	-	-	0,65	-	0,37	0,5	30/12		15	14	10	7	4	99036	97133	-
Prisma 15 3	8,5	4,7	2,5	1,5	0,95	0,9	0,55	0,75	30/12		31	27	20	15	9	99041	97140	97137

Curva de funcionamiento a 3450 rpm



Dimensión y peso

Modelo	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	Kg
Prisma 15 1	139	189	202	110	74	162	121	102	1"	1"	8,3
Prisma 15 2	163	213	202	110	74	162	121	102	1"	1"	9,2
Prisma 15 3	187	237	202	110	74	162	121	102	1"	1"	10



Tecno 05 Superficie horizontal



Bomba centrífuga multietapa para el suministro de agua

Aplicaciones

Bombeo de aguas limpias para uso doméstico, industrial, agrícola y jardinería.
Silenciosa.
Autoaspirante hasta 2m.

Motor

Asíncrono 2 polos.
Protección IPX5.
Aislamiento clase F.
Protección térmica incorporada.
Servicio continuo.

Materiales

Cuerpo bomba e impulsores en AISI 304.
Eje bomba en AISI 431.
Difusores en tecnopolímero.
Cierre mecánico en alúmina-grafito.
Carcasa motor en aluminio.
Juntas en NBR/EPDM.

Limitaciones

Temperatura máxima del agua: 40° C

Equipamiento

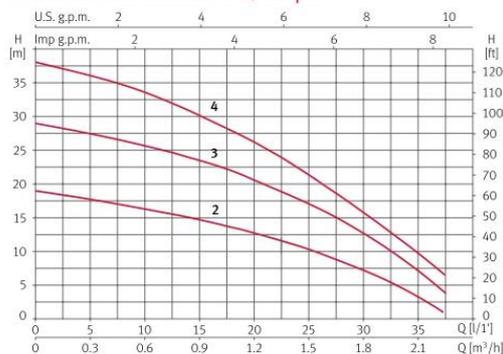
Sin cable.



Tabla de funcionamiento hidráulico

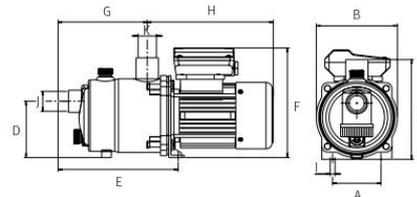
Modelo	I [A]	P1 [kW]	P2		c [µF]	l/min	5	10	15	20	25	30	35	37	Código
	1~ 230V	1~	[kW]	[HP]			m³/h	0,3	0,6	0,9	1,2	1,5	1,8	2,1	
Tecno 05 2	1,2	0,25	0,11	0,15	6	mca	18	17	15	13	10	7	3	1	97502
Tecno 05 3	1,6	0,35	0,19	0,25	6		27	26	23	20	17	12	7	4	97505
Tecno 05 4	2	0,45	0,19	0,25	6		36	33	30	26	21	16	10	7	97508

Curva de funcionamiento a 2900 rpm



Dimensión y peso

Modelo	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	Kg
Tecno 05 2	80	136	158	94	176	174	124	225	9	1"	1"	5,2
Tecno 05 3	80	136	158	94	194	174	142	225	9	1"	1"	6,2
Tecno 05 4	80	136	158	94	212	174	159	225	9	1"	1"	6,3



Planos

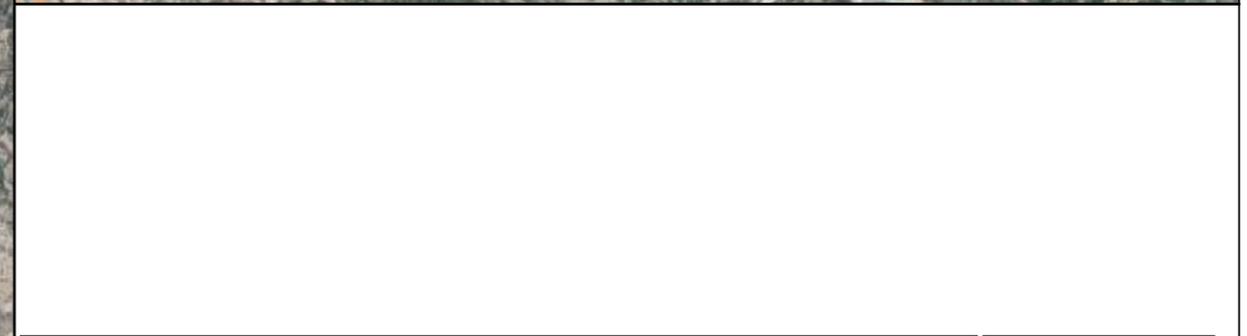
ÍNDICE DE LOS PLANOS

1. Ubicación de la planta.....	285
2. Diagrama de flujo.....	285
3. Distribución en planta.....	285

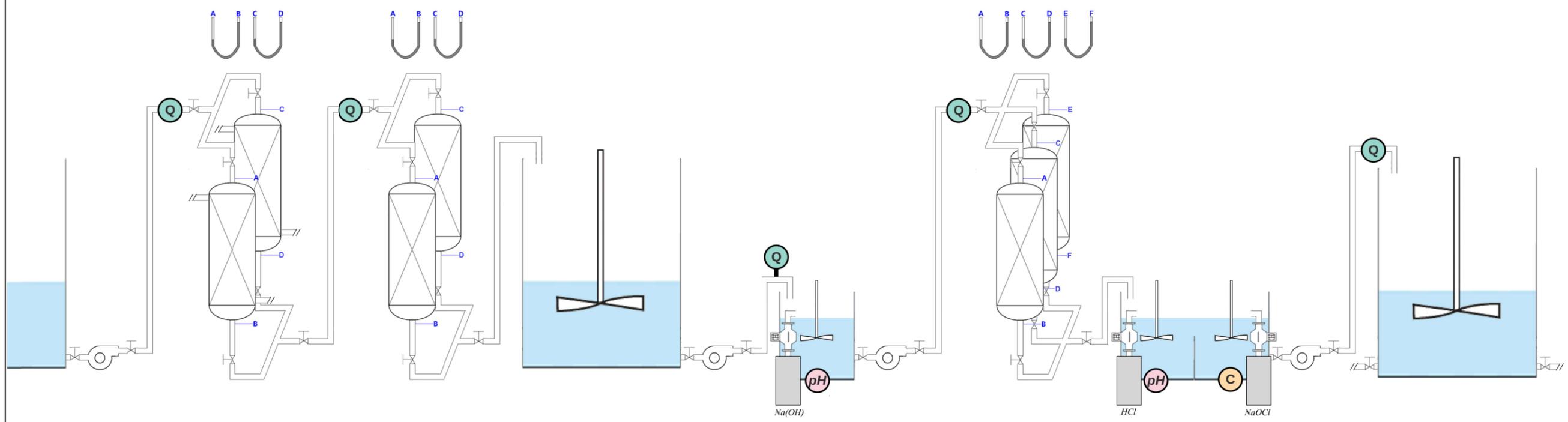
1. Ubicación de la planta

2. Diagrama de flujo

3. Distribución en planta



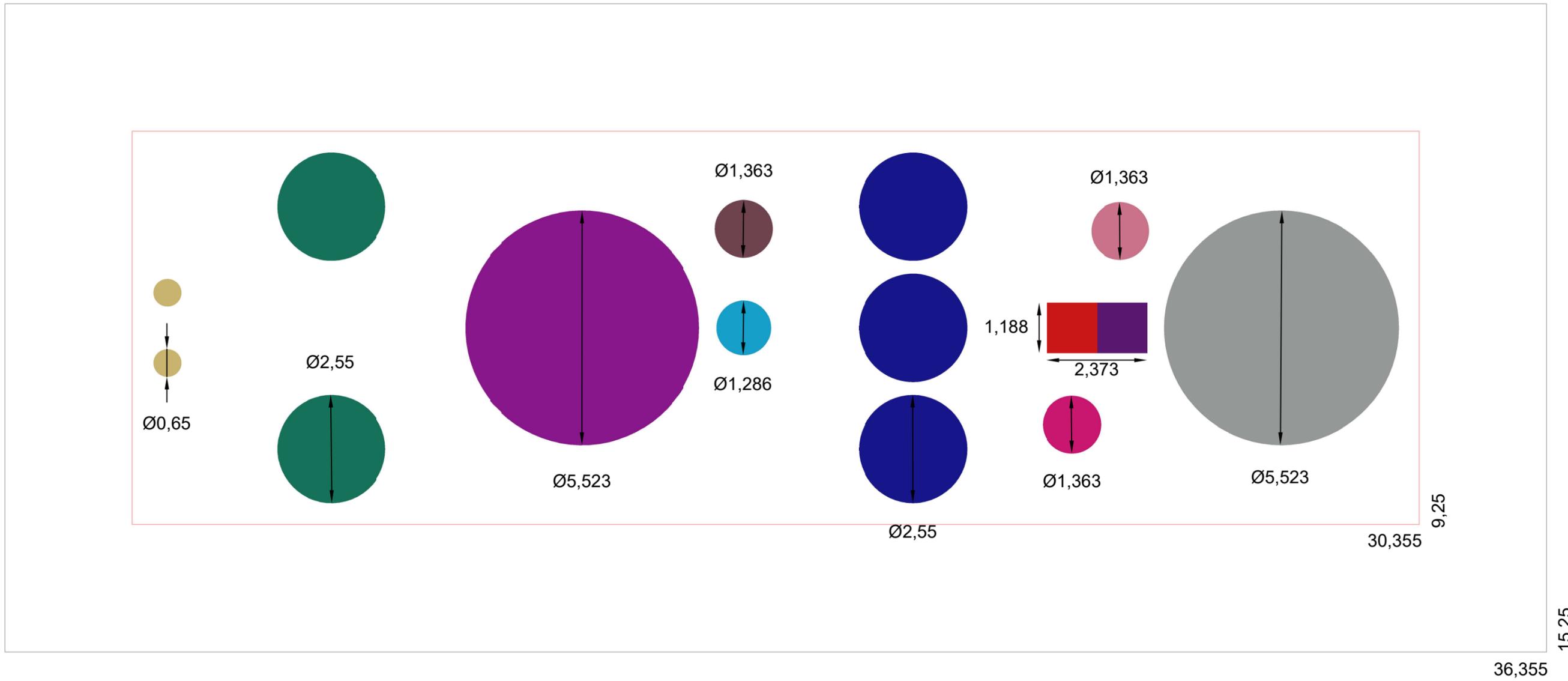
TÍTULO		Ubicación de la planta		PLANO Nº	01	
PROPIETARIO		Sergio Bonete Encinas		FIRMA		
UNIDADES		-		FORMATO	A3	
ESCALA	PLANO		Ubicación/Emplazamiento			
FECHA	Septiembre 2021					



Balsa de homogeneización del tratamiento físico-químico Filtros de profundidad de arena Columnas de adsorción con GAC Balsa pulmón Reactor de elevación de pH Columnas de adsorción con IGAC Reactor de disminución de pH Tanque de cloración Tanque final de almacenamiento

- Bomba centrífuga
- Válvula de asiento
- Caudalímetro
- Manómetro diferencial
- Depósito de reactivo
- Bomba dosificadora
- Control de pH
- Control de cloro libre

TÍTULO Digrama de flujo (dimensiones no representativas)		PLANO N° 02
PROPIETARIO Sergio Bonete Encinas		FIRMA
UNIDADES -	FORMATO A3	
ESCALA -	PLANO Diagrama de flujo	
FECHA Septiembre 2021		



- Filtros de profundidad
- Columnas de adsorción con GAC
- Balsa pulmón
- Reactor de elevación de *pH*
- Depósito de *Na(OH) 0,01 M*
- Columnas de adsorción con IGAC
- Reactor de disminución de *pH*
- Depósito de *HCl 0,01 M*
- Tanque de cloración
- Depósito de *NaClO 10%*
- Tanque final de almacenamiento

— Superficie mínima requerida
 — Superficie requerida

TÍTULO		Distribución en planta		PLANO N°	
PROPIETARIO		Sergio Bonete Encinas		03	
UNIDADES		Milímetros			
FORMATO		A3		FIRMA	
ESCALA	1:100	PLANO			
FECHA	Septiembre 2021				
		Plano de distribución			

Pliego de condiciones

INDICE DEL PLIEGO DE CONDICIONES:

1) PLIEGO DE CONDICIONES GENERALES, FACULTATIVAS Y ECONÓMICAS.....	295
1. DISPOSICIONES GENERALES.....	295
1.1. Disposiciones de carácter general	295
1.1.1. Objeto del pliego de condiciones.....	295
1.1.2. Contrato de obra	295
1.1.3. Documentación del contrato de obra	295
1.1.4. Proyecto arquitectónico	295
1.1.5. Reglamentación urbanística.....	296
1.1.6. Formulación del contrato de obra	296
1.1.7. Jurisdicción competente	297
1.1.8. Responsabilidad del contratista	297
1.1.9. Accidentes de trabajo.....	297
1.1.10. Daños y perjuicios a terceros.....	297
1.1.11. Anuncios y carteles.....	298
1.1.12. Copia de documentos.....	298
1.1.13. Suministro de materiales	298
1.1.14. Hallazgos	298
1.1.15. Causas de rescisión del contrato de obra.....	299
1.1.16. Omisiones: Buena fe.....	299
1.2. Disposiciones relativas a trabajos, materiales y medios auxiliares.....	300
1.2.1. Accesos y vallados.....	300
1.2.2. Replanteo	300
1.2.3. Inicio de la obra y ritmo de ejecución de los trabajos	300
1.2.4. Orden de los trabajos	301
1.2.5. Facilidades para otros contratistas	301

1.2.6. Ampliación del proyecto por causas imprevistas o de fuerza mayor	302
1.2.7. Interpretaciones, aclaraciones y modificaciones del proyecto	302
1.2.8. Prorroga por causa de fuerza mayor	302
1.2.9. Responsabilidad de la dirección facultativa en el retraso de la obra	303
1.2.10. Trabajos defectuosos	303
1.2.11. Vicios ocultos	303
1.2.12. Procedencia de materiales, aparatos y equipos.....	304
1.2.13. Presentación de muestras.....	304
1.2.14. Materiales, aparatos y equipos defectuosos.....	304
1.2.15. Gastos ocasionados por pruebas y ensayos	304
1.2.16. Facilidades para otros contratistas	305
1.2.17. Obras sin prescripciones explicitas.....	305
1.3. Disposiciones de las recepciones de edificios y obras anexas	305
1.3.1. Consideraciones de carácter general.....	305
1.3.2. Recepción provisional	306
1.3.3. Documentación final de la obra.....	307
1.3.4. Medición definitiva y liquidación provisional de la obra.....	307
1.3.5. Plazo de garantía.....	307
1.3.6. Conservación de las obras recibidas provisionalmente	307
1.3.7. Recepción definitiva	308
1.3.8. Prórroga del plazo de garantía	308
1.3.9. Recepciones de trabajos cuya contrata haya sido rescindida	308
2. DISPOSICIONES FACULTATIVAS.....	308
2.1. Definición y atribuciones de los agentes de la edificación	308
2.1.1. El Promotor.....	309
2.1.2. El Proyectista.....	309
2.1.3 El contratista.....	309
2.1.4. EL Director de Obra	310

2.1.5. El Director de la Ejecución de la Obra	310
2.1.6. Las entidades y laboratorios de control de calidad de la instalación	310
2.1.7. Los suministradores de productos	310
2.2. La dirección facultativa	311
2.3. Visitas facultativas.....	311
2.4. Obligaciones de los agentes intervinientes	311
2.4.1. El Promotor.....	311
2.4.2. El Proyectista.....	312
2.4.3 El contratista	313
2.4.4. El Director de Obra.....	315
2.4.5. El Director de la Ejecución de la Obra	317
2.4.6. Las entidades y laboratorios de control de calidad de la instalación	319
2.4.7. Los suministradores de productos	319
2.4.8. Los propietarios y los usuarios	319
2.5. Documentación final de la obra	320
3. DISPOSICIONES ECONÓMICAS	320
3.1. Definición	320
3.2. Contrato de Obra	320
3.3. Criterio general	321
3.4. Fianzas.....	322
3.4.1. Ejecución de trabajos con cargo a la fianza.....	322
3.4.2. Devolución de las fianzas	322
3.4.3. Devolución de la fianza en el caso de efectuarse recepciones parciales	322
3.5. De los precios	322
3.5.1. Precio básico.....	323
3.5.2. Precio unitario.....	323
3.5.3. Presupuesto de ejecución del material (PEM).....	324
3.5.4. Precios contradictorios	325

3.5.5. Reclamación de aumento de precios	325
3.5.6. Formas tradicionales de medir o de aplicar los precios.....	325
3.5.7. De la revisión de los precios contratados	325
3.5.8. Acopio de materiales	326
3.6. Obras de administración	326
3.7. Valoración y abono de los trabajos.....	326
3.7.1. Forma y plazos de abono de las obras	326
3.7.2. Relaciones valoradas y certificaciones	327
3.7.3. Mejora de obras libremente ejecutadas	327
3.7.4. Abono de trabajos presupuestados con partida alzada	328
3.7.5. Abono de trabajos ejecutados durante el plazo de garantía.....	328
3.7.6. Abono de trabajos ejecutados durante el plazo de garantía.....	328
3.8. Indemnizaciones mutuas.....	328
3.8.1. Indemnización por retraso del plazo de terminación de las obras	329
3.8.2. Demora de los pagos por parte del promotor	329
3.9. Varios.....	329
3.9.1. Mejoras, aumentos y/o reducciones de obra.....	329
3.9.2. Unidades de obra defectuosas.....	329
3.9.3. Seguro de obras	329
3.9.4. Conservación de la obra	330
3.9.5. Uso por el Contratista de edificio o bienes del Promotor.....	330
3.10. Retenciones en concepto de garantía	330
3.11. Plazos de ejecución: Planning de la obra	331
3.12. Liquidación económica de las obras	331
3.13. Liquidación final de la obra	331
2) PLIEGO DE CONDICIONES TÉCNICAS PARTICULARES	332
1. Objeto	332
2. Prescripciones sobre los materiales	332

2.1. Condiciones técnicas generales	332
2.1.1. Calidad de los materiales	333
2.1.2. Pruebas y ensayos de los materiales	333
2.1.3. Materiales no consignados en los pliegos	333
2.2. Materiales para hormigones y morteros	333
2.2.1. Aguas	334
2.2.2. Áridos.....	334
2.2.3. Aditivos.....	335
2.2.4. Cementos.....	336
2.3. Hormigones	336
2.4. Aceros.....	337
2.4.1. Acero corrugado para armar	337
2.4.2. Acero laminado.....	337
2.5. Instalaciones eléctricas	337
3. Condiciones de equipos electromecánicos.....	338
3.1. Generalidades de los equipos electromecánicos.....	338
3.2. Control de calidad externo.....	339
3.3. Control de calidad interno	339
3.4. Pruebas de funcionamiento.....	340
3.5. Equipos de reserva.....	341
3.6. Documentación exigida de los equipos	341
4. Prescripciones de ejecución de las obras.....	342
4.1. Dirección de la obra.....	343
4.2. Ocupación y presencia del contratista	343
4.3. Condiciones generales de ejecución	343
4.3.1. Replanteo	343
4.3.2. Movimiento de tierras	344
4.3.2.1. Desbroce	344

4.3.2.2. Explanación y prestamos	344
4.3.2.3. Excavación en zanjas y pozos	344
4.3.2.4. Relleno y apisonado de zanjas o pozos	345
4.3.3. Red de saneamiento	346
4.3.4. Instalación de tuberías.....	347
4.3.5. Estructuras.....	347
4.3.6. Instalación eléctrica	348
4.3.7. Pinturas	350
4.4. Precauciones que adoptar	352

1) Pliego de condiciones generales, facultativas y económicas

1. Disposiciones generales

1.1. Disposiciones de carácter general

1.1.1. Objeto del pliego de condiciones

La finalidad de este pliego es la de fijar los criterios de la relación que se establece entre los agentes que intervienen en las obras definidas en el presente proyecto y servir de base para la relación del contrato de obra entre el Promotor y el Contratista.

1.1.2. Contrato de obra

El presente contrato tiene por objetivo la construcción y producción de un tratamiento terciario especializado en la eliminación de boro de aguas residuales de procedencia industrial cerámica. Se recomienda la contratación de la ejecución de las obras por unidades de obra, con arreglo a los documentos del proyecto y en cifras fijas. A tal fin, el director de obra ofrece la documentación necesaria para la realización del contrato de obra.

1.1.3. Documentación del contrato de obra

Integran el contrato de obra los siguientes documentos, relacionados por orden de prelación atendiendo al valor de sus especificaciones, en el caso de posibles interpretaciones, omisiones o contradicciones:

- Las condiciones fijadas en el contrato de obra.
- El presente Pliego de Condiciones.
- La documentación gráfica y escrita del proyecto: planos generales y de detalle, memorias, anexos, mediciones y presupuestos.

En caso de interpretación prevalecen las especificaciones literales sobre las gráficas y las cotas sobre las medidas a escala tomadas de los planos.

1.1.4. Proyecto arquitectónico

El Proyecto Arquitectónico es el conjunto de documentos que definen y determinan las exigencias técnicas, funcionales y estéticas de las obras contempladas en el artículo 2 de la Ley de Ordenación de la Edificación. En él se justificará técnicamente las soluciones propuestas de acuerdo con las especificaciones requeridas por la normativa técnica aplicable.

Cuando el proyecto se desarrolle o complete mediante proyectos parciales u otros documentos técnicos sobre tecnologías específicas o instalaciones del edificio, se mantendrá entre todos ellos la necesaria coordinación, sin que se produzca una duplicidad en la documentación ni en los honorarios a percibir por los autores de los distintos trabajos indicados.

Los documentos complementarios al Proyecto serán:

- Todos los planos o documentos de obra que, a lo largo de la misma, vaya suministrando la Dirección de obra como interpretación, complemento o precisión.
- El Libro de Órdenes y Asistencias
- El programa de Control de Calidad de Edificación y su libro de Control.
- El Estudio Básico de Seguridad y Salud en las obras.
- El Plan de Seguridad y Salud en el trabajo, elaborado por cada Contratista.
- Estudio de Gestión de Residuos de Construcción y Demolición.
- Licencias y otras autorizaciones administrativas.

1.1.5. Reglamentación urbanística

La obra se ajustará a todas las limitaciones del proyecto aprobado por los organismos competentes, especialmente las que se refieren al volumen, alturas, emplazamiento y ocupación del solar, así como a todas las condiciones de reforma del proyecto que pueda exigir la Administración para ajustarlo a las ordenanzas, a las Normas y al Planteamiento Vigente.

1.1.6. Formulación del contrato de obra

Los Contratos se formalizarán, en general, mediante documento privado, que podrá elevarse a escritura pública, a petición de cualquiera de las partes.

El cuerpo de estos documentos contendrá:

- La comunicación de la adjudicación.
- La copia del recibo de depósito de la fianza (en caso de que se haya exigido).

- La cláusula en la que se exprese, de forma categórica, que el Contratista se obliga al cumplimiento estricto del contrato de obra, conforme a lo previsto en este Pliego de Condiciones, junto con la Memoria y sus Anexos, el Estado de Mediciones, Presupuestos, Planos y todos los documentos que han de servir de base para la realización de las obras definidas en el presente Proyecto.

1.1.7. Jurisdicción competente

En el caso de no llegar a un acuerdo cuando surjan diferencias entre las partes, ambas quedan obligadas a someter la discusión de todas las cuestiones derivadas de su contrato a las Autoridades y Tribunales Administrativos con arreglo a la legislación vigente, renunciando al derecho común y al fuero de su domicilio, siendo competente la jurisdicción donde estuviese ubicada la obra.

1.1.8. Responsabilidad del contratista

El Contratista es responsable de la ejecución de las obras en las condiciones establecidas en el contrato y en los documentos que componen el Proyecto.

En consecuencia, quedará obligado a la demolición y reconstrucción de todas las unidades de obra con deficiencias o mal ejecutadas, sin que pueda servir de excusa el hecho de que la Dirección Facultativa haya examinado y reconocido la construcción durante sus vistas de obra, ni que hayan sido abonadas en liquidaciones parciales.

1.1.9. Accidentes de trabajo

Es de obligado cumplimiento el R.D. 1627/1997, de 24 de octubre, por el que se establecen las disposiciones mínimas de seguridad y salud en las obras de construcción y demás legislación vigente que, tanto directa como indirectamente, inciden sobre la planificación de seguridad y salud en el trabajo de la construcción, conservación y mantenimiento de edificios.

Es responsabilidad del coordinador de Seguridad y Salud, en virtud del R.D. 1627/97, el control y el seguimiento, durante toda la ejecución de la obra, del Plan de Seguridad y Salud redactado por el Contratista.

1.1.10. Daños y perjuicios a terceros

El Contratista será el responsable de todos los accidentes que, por inexperiencia o descuido, sobrevinieran tanto en la edificación donde se efectúen las obras como en las colindantes o contiguas.

Será por tanto de su cuenta el abono de las indemnizaciones a quien corresponda y cuando a ello hubiere lugar, y de todos los daños y perjuicios que puedan ocasionarse o causarse en las operaciones de la ejecución de las obras.

Asimismo, será responsable de los daños y perjuicios directos o indirectos que se puedan ocasionar frente a terceros como consecuencia de la obra, tanto en ella como en sus alrededores, incluso los que se produzcan por omisión o negligencia del personal a su cargo, así como los que se deriven de los subcontratistas e industriales que intervengan en la obra.

Es de su responsabilidad mantener vigente durante la ejecución de los trabajos una póliza de seguros frente a terceros, en modalidad de “Todo riesgo al derribo y la construcción”, suscrita por una compañía aseguradora con la suficiente solvencia para cobertura de los trabajos contratados. Dicha póliza será aportada y ratificada por el Promotor o Propiedad, no pudiendo ser cancelada mientras no se firme el Acta de Recepción Provisional de la obra.

1.1.11. Anuncios y carteles

Sin previa autorización del Promotor, no se podrán colocar en las obras ni en sus vallas más inscripciones o anuncios que los convenientes al régimen de los trabajos y los exigidos por la policía local.

1.1.12. Copia de documentos

El Contratista, a su costa, tiene derecho a sacar copias de los documentos integrantes del Proyecto.

1.1.13. Suministro de materiales

Se especificará en el Contrato la responsabilidad que pueda caber al Contratista por el retraso en el plazo de terminación o en plazos parciales, como consecuencia de deficiencias o faltas en los suministros.

1.1.14. Hallazgos

El Promotor se reserva la posesión de las antigüedades, objetos de arte o sustancias minerales utilizables que se encuentren en las excavaciones y demoliciones practicadas en sus terrenos o edificaciones. El Contratista deberá emplear, para extraerlos, todas las precauciones que se le indiquen por parte del Director de Obra.

El promotor abonará al Contratista el exceso de obras o gastos especiales que estos trabajos ocasionen, siempre que estén debidamente justificados y aceptados por la Dirección Facultativa.

1.1.15. Causas de rescisión del contrato de obra

Se considerarán causas suficientes de rescisión de contrato:

- La muerte o incapacitación del Contratista.
- La quiebra del Contratista.
- Las alteraciones del contrato por las causas siguientes:
 - La modificación del proyecto en forma tal que represente alteraciones fundamentales del mismo a juicio del Director de Obra y, en cualquier caso, siempre que la variación del Presupuesto de Ejecución Material, como consecuencia de estas modificaciones, represente una desviación mayor del 20%.
 - Las modificaciones de unidades de obra, siempre que representen variaciones en más o en menos del 40% del proyecto original, o más de un 50% de unidades de obra del proyecto reformado.
- La suspensión de obra comenzada, siempre que el plazo de suspensión haya excedido de un año y, en todo caso, siempre que por causas ajenas al Contratista no se dé comienzo a la obra adjudicada dentro del plazo de tres meses a partir de la adjudicación. En este caso, la devolución de la fianza será automática.
- Que el Contratista no comience los trabajos dentro del plazo señalado en el contrato.
- El incumplimiento de las condiciones del contrato cuando implique descuido o mala fe, con perjuicio de los intereses de las obras.
- El vencimiento del plazo de ejecución de la obra.
- El abandono de la obra sin causas justificadas.
- La mala fe en la ejecución de la obra.

1.1.16. Omisiones: Buena fe

Las relaciones entre el Promotor y el Contratista, reguladas por el presente Pliego de Condiciones y la documentación complementaria, presentan la prestación de un servicio al Promotor por parte del contratista mediante la ejecución de una obra, basándose en la BUENA FE mutua de ambas partes,

que pretenden beneficiarse de esta colaboración sin ningún tipo de perjuicio. Por este motivo, las relaciones entre ambas partes y las omisiones que pueda existir en este Pliego y la documentación complementaria del proyecto y de la obra, se entenderán siempre suplidas por la BUENA FE de las partes, que las subsanarán debidamente con el fin de conseguir una adecuada CALIDAD FINAL de la obra.

1.2. Disposiciones relativas a trabajos, materiales y medios auxiliares

Se describen las disposiciones básicas a considerar en la ejecución de las obras relativas a los trabajos, materiales y medios auxiliares, así como a las recepciones de los edificios objeto del presente proyecto y sus obras anexas.

1.2.1. Accesos y vallados

El Contratista dispondrá, por su cuenta, los accesos a la obra, el cerramiento o el vallado de ésta y su mantenimiento durante la ejecución de la obra, pudiendo exigir el Director de Ejecución de la obra su modificación o mejora.

1.2.2. Replanteo

El contratista iniciará “in situ” el replanteo de las obras, señalando las referencias principales que mantendrá como base de posteriores replanteos parciales.

Dichos trabajos se considerarán a cargo del Contratista e incluidos en su oferta económica.

Asimismo, someterá el replanteo a la aprobación del Director de Ejecución de la obra y, una vez éste haya dado su conformidad, preparará el Acta de Inicio y Replanteo de la Obra acompañada de un plano de replanteo definitivo, que deberá ser aprobado por el Director de Obra. Será responsabilidad del Contratista la deficiencia o la omisión de este trámite.

1.2.3. Inicio de la obra y ritmo de ejecución de los trabajos

El Contratista dará comienzo a las obras en el plazo especificado en el respectivo contrato, desarrollándose de manera adecuada para que dentro de los períodos parciales señalados se realicen los trabajos, de modo que la ejecución total se lleve a cabo dentro del plazo establecido en el contrato.

Será obligación del contratista comunicar a la Dirección Facultativa el inicio de las obras, de forma fehaciente y preferiblemente por escrito, al menos con tres días de antelación.

El Director de Obra redactará el acta de comienzo de la obra y la suscribirán en la misma obra junto con él, el día de comienzo de los trabajos, el director de la Ejecución de la obra, el promotor y el contratista.

Para la formalización del acta de comienzo de la obra, el Director de la obra comprobará que en la obra existe copia de los siguientes documentos.

- Proyecto de Ejecución, Anexos y modificaciones.
- Plan de Seguridad y Salud en el Trabajo y su acta de aprobación por parte del coordinador de Seguridad y Salud durante la ejecución de los trabajos.
- Licencia de Obra otorgada por el Ayuntamiento.
- Aviso previo a la Autoridad laboral competente efectuado por el promotor.
- Comunicación de apertura de centro de trabajo efectuada por el Contratista.
- Otras autorizaciones, permisos y licencias que sean preceptivas por otras administraciones.
- Libro de Órdenes y Asistencias.
- Libro de Incidencias.
- La fecha del acta de comienzo de la obra marca el inicio de los plazos parciales y total de la ejecución de la obra.

1.2.4. Orden de los trabajos

La determinación del orden de los trabajos es, generalmente, facultad del Contratista, salvo en aquellos casos en que, por circunstancias de naturaleza técnica, se estime conveniente su variación por parte de la Dirección Facultativa.

1.2.5. Facilidades para otros contratistas

De acuerdo con lo que requiera la Dirección Facultativa, el Contratista dará todas las facilidades razonables para la realización de los trabajos que le sean encomendados a los Subcontratistas u otros Contratistas que intervengan en la ejecución de la obra. Todo ello sin perjuicio de las compensaciones económicas a que haya lugar por la utilización de los medios auxiliares o los suministros de energía u otros conceptos.

En caso de litigio todos ellos se ajustarán a lo que resuelva la Dirección Facultativa.

1.2.6. Ampliación del proyecto por causas imprevistas o de fuerza mayor

Cuando se precise ampliar el Proyecto, por motivo imprevisto o por cualquier incidencia, no se interrumpirán los trabajos, continuándose según las instrucciones de la Dirección Facultativa en tanto se formula o se tramita el Proyecto Reformado.

El Contratista está obligado a realizar, con su personal y sus medios materiales, cuanto la Dirección de Ejecución de la Obra disponga para apeos, apuntalamientos, derribos, recalces o cualquier obra de carácter urgente, anticipando de momento este servicio, cuyo importe le será consignado en un presupuesto adicional o abonado directamente, de acuerdo con lo que se convenga.

1.2.7. Interpretaciones, aclaraciones y modificaciones del proyecto

El Contratista podrá requerir del Director de obra o del Director de Ejecución de la obra, según sus respectivos cometidos y atribuciones, las instrucciones o aclaraciones que se precisen para la correcta interpretación y ejecución de la obra proyectada.

Cuando se trate de interpretar, aclarar o modificar preceptos de los Pliegos de condiciones o indicaciones de los planos, croquis, órdenes e instrucciones correspondientes, se comunicarán necesariamente por escrito al Contratista, estando éste a su vez obligado a devolver los originales o las copias, suscribiendo con su firma el enterado, que figurará al pie de todas las órdenes, avisos e instrucciones que reciba tanto del director de Ejecución de la obra, como del Director de Obra.

Cualquier reclamación que crea oportuno hacer el contratista en contra de las disposiciones tomadas por la Dirección Facultativa, habrá de dirigirla, dentro del plazo de tres días, a quien la hubiera dictado, el cual le dará el correspondiente recibo, si éste lo solicitase.

1.2.8. Prorroga por causa de fuerza mayor

Por causa de fuerza mayor o independientemente de la voluntad del Contratista, éste no pudiese comenzar las obras, tuviese que suspenderlas o no le fuera posible terminarlas en los plazos prefijados, se le otorgará una prórroga proporcionada para su cumplimiento, previo informe favorable del Director de obra. Para ello, el Contratista expondrá, en escrito dirigido al Director de Obra, la causa que impide la ejecución o la marcha de los trabajos y el retraso que por ello se originaría en los plazos acordados, razonando debidamente la prórroga que por dicha causa solicita.

1.2.9. Responsabilidad de la dirección facultativa en el retraso de la obra

El Contratista no podrá excusarse de no haber cumplido los plazos de obras estipulados, alegando como causa la carencia de planos u órdenes de la Dirección Facultativa, a excepción del caso en que habiéndolo solicitado por escrito, no se le hubiese proporcionado.

1.2.10. Trabajos defectuosos

El Contratista debe emplear los materiales que cumplan las condiciones exigidas en el proyecto, y realizará todos y cada uno de los trabajos contratados de acuerdo con lo estipulado.

Por ello, y hasta que tenga lugar la recepción definitiva de la instalación, el Contratista es responsable de la ejecución de los trabajos que ha contratado y de las faltas y defectos que puedan existir por su mala ejecución, no siendo eximente el que la Dirección Facultativa lo haya examinado o reconocido con anterioridad, ni tampoco el hecho de que estos trabajos haya sido valorados en las Certificaciones Parciales de obra, que siempre se entenderán extendidas y abonadas a buena cuenta.

Como consecuencia de lo anteriormente expresado, cuando el Director de Ejecución de la Obra advierta vicios o defectos en los trabajos ejecutados, o que los materiales empleados o los aparatos y equipos colocados no reúnen las condiciones preceptuadas, ya sea en el curso de la ejecución de los trabajos o una vez finalizados con anterioridad a la recepción definitiva de la obra, podrá disponer que las partes defectuosas sean

sustituidas o demolidas y reconstruidas de acuerdo con lo contratado a expensas del Contratista. Si ésta no estimase justa la decisión y se negase a la sustitución, demolición y reconstrucción ordenadas, se planteará la cuestión ante el Director de Obra, quien medirá para resolverla.

1.2.11. Vicios ocultos

El Contratista es el único responsable de los vicios ocultos y de los defectos de la construcción, durante la ejecución de las obras y el período de garantía, hasta los plazos prescritos después de la terminación de las obras, aparte de otras responsabilidades legales o de cualquier índole que puedan derivarse.

Si el Director de Ejecución de la Obra tuviese fundadas razones para creer en la existencia de vicios ocultos de construcción en las obras ejecutadas, ordenará, cuando estime oportuno, realizar antes de la recepción definitiva los ensayos, destructivos o no, que considere necesarios para reconocer o diagnosticar los trabajos que suponga defectuosos, dando cuenta de la circunstancia al Director de la Obra.

El Contratista demolerá y reconstruirá posteriormente a su cargo, todas las unidades de obra mal ejecutadas, sus consecuencias, daños y perjuicios, no pudiendo eludir su responsabilidad por el hecho de que el director de Obra y/o el Director de Ejecución de Obra lo hayan examinado o reconocido con anterioridad, o que haya sido conformada o abonada una parte o la totalidad de las obras mal ejecutadas.

1.2.12. Procedencia de materiales, aparatos y equipos

El Contratista tiene libertad de proveerse de los materiales, aparatos y equipos de todas clases donde considere oportuno y conveniente para sus intereses, excepto en aquellos casos en los que se preceptúe una procedencia y características específicas en el proyecto.

Obligatoriamente, y antes de proceder a su empleo, acopio y puesta en obra, el Contratista deberá presentar al Director de Ejecución de la obra una lista completa de los materiales, aparatos y equipos que vaya a utilizar, en la que se especifiquen todas las indicaciones sobre sus características técnicas, marcas, calidades, procedencia e idoneidad de cada uno de ellos.

1.2.13. Presentación de muestras

A petición del Director de Obra, el contratista presentará las muestras de los materiales, aparatos y equipos, siempre con la antelación prevista en el calendario de obra.

1.2.14. Materiales, aparatos y equipos defectuosos

Cuando los materiales, aparatos, equipos y elementos de instalaciones no fuesen de la calidad y características técnicas prescritas en el proyecto, no tuvieran la preparación en él exigida o cuando, a falta de prescripciones formales, se reconociera o demostrara que no son los adecuados para su fin, el Director de Obra, a instancias del Director de Ejecución de la Obra, dará la orden al Contratista de sustituirlos por otros que satisfagan las condiciones o sean los adecuados al fin al que se destinen.

Si, a los 15 días de recibir el Contratista orden de que retire los materiales que no están en condiciones, ésta no ha sido cumplida, podrá hacerlo el Promotor o Propiedad a cuenta del Contratista.

En el caso de que los materiales, aparatos, equipos o elementos de instalaciones fueran defectuosos, pero aceptables a juicio del Director de Obra, se recibirán con la rebaja del precio que aquél determine, a no ser que el Contratista prefiera sustituirlos por otros en condiciones.

1.2.15. Gastos ocasionados por pruebas y ensayos

Todos los gastos originados por las pruebas y ensayos de materiales o elementos que intervengan en la ejecución de las obras correrán a cargo y cuenta del Contratista.

Todo ensayo que no resulte satisfactorio, no se realice por omisión del Contratista, o que no ofrezca las suficientes garantías, podrá comenzarse nuevamente o realizarse nuevos ensayos o pruebas especificadas en el proyecto, a cargo y cuenta del Contratista y con la penalización correspondiente, así como todas las obras complementarias a que pudieran dar lugar cualquiera de los supuestos anteriormente citados y que el Director de Obra considere necesarios.

1.2.16. Limpieza de las obras

Es obligación del Contratista mantener limpias las obras y sus alrededores tanto de escombros como de materiales sobrantes, retirar las instalaciones provisionales que no sean necesarias, así como ejecutar todos los trabajos y adoptar las medidas que sean apropiadas para la obra presente buen aspecto.

1.2.17. Obras sin prescripciones explícitas

En la ejecución de trabajos que pertenecen a la construcción de las obras, y para los cuales no existan prescripciones consignadas explícitamente en este Pliego ni en la restante documentación del proyecto, el Contratista se atenderá, el primer término a las instrucciones que dicte la Dirección Facultativa de las obras, y, en segundo lugar, a las normas y prácticas de la buena construcción.

1.3. Disposiciones de las recepciones de edificios y obras anexas

1.3.1. Consideraciones de carácter general

La recepción de la obra es el acto por el cual el Contratista, una vez concluida la obra, hace entrega de esta al Promotor y es aceptada por éste. Podrá realizarse con o sin reservas y deber abarcar la totalidad de la obra o fases completas y terminadas de la misma, cuando así se acuerde por las partes.

La recepción debe consignarse en un acta firmada, al menos, por el Promotor y el contratista, haciendo constar:

- Las partes que intervienen.
- La fecha del certificado final de la totalidad de la obra o de la fase completa y terminada de la misma.

- El coste final de la ejecución material de la obra.
- La declaración de la recepción de la obra con o sin reservas, especificando, en su caso, éstas de manera objetiva, y el plazo en que deberán quedar subsanados los defectos observados. Una vez subsanados los mismos, se hará constar en un acta aparte, suscrita por los firmantes de la recepción.
- Las garantías que, en su caso, se exijan al Contratista para asegurar sus responsabilidades.

Asimismo, se adjuntará el certificado final de obra suscrito por el Director de Obra y el Director de la Ejecución de la Obra.

El Promotor podrá rechazar la recepción de la obra por considerar que la misma no está terminada o que no se adecúa a las condiciones contractuales.

En todo caso, el rechazo deberá ser motivado por escrito en el acta, en la que se fijará el nuevo plazo para efectuar la recepción.

Salvo pacto expreso en contrario, la recepción de la obra tendrá lugar dentro de los treinta días siguientes a la fecha de su terminación, acreditada en el certificado final de obra, plazo que se contará a partir de la notificación efectuada por escrito al promotor. La recepción se entenderá tácitamente producida si transcurridos treinta días desde la fecha indicada el promotor no hubiera puesto de manifiesto reservas o rechazo motivado por escrito.

El cómputo de los plazos de responsabilidad y garantía será el establecido en la legislación, y se iniciará a partir de la fecha en que se suscriba el acta de recepción, o cuando se entienda ésta tácitamente producida según lo previsto en el apartado anterior.

1.3.2. Recepción provisional

Treinta días antes de dar por finalizadas las obras, comunicará el Director de Ejecución de la Obra al Promotor o Propiedad la proximidad de su terminación a fin de convenir el acto de la Recepción Provisional.

Ésta se realizará con la intervención de la Propiedad, del Contratista, del Director de Obra y del Director de Ejecución de la Obra. Se convocará también a los restantes técnicos que, en su caso, hubiesen intervenido en la dirección con función propia en aspectos parciales o unidades especializadas.

Practicando un detenido reconocimiento de las obras, se extenderá un acta con tanto ejemplares como intervinientes y firmados por todos ellos. Desde esta fecha empezará a correr el plazo de garantía, si las obras se hallasen en estado de ser admitidas.

Seguidamente, los Técnicos de la Dirección extenderán el correspondiente Certificado de Final de Obra.

Cuando las obras no se hallen en estado de ser recibidas, se hará constar expresamente en el Acta y se darán al Contratista las oportunas instrucciones para subsanar los defectos observados, fijando un plazo para subsanarlos, expirado el cual se efectuará un nuevo reconocimiento a fin de proceder a la recepción provisional de la obra.

Si el Contratista no hubiese cumplido, podrá declararse resuelto el contrato con la pérdida de la fianza.

1.3.3. Documentación final de la obra

El director de Ejecución de la obra, asistido por el Contratista y los técnicos que hubieran intervenido en la obra, redactará la documentación final de las obras, que se facilitará al Promotor, con las especificaciones y contenidos dispuestos por la legislación vigente, en el caso de viviendas con lo que se establece los párrafos 2, 3, 4 y 5 del apdo. 2 del art. 4º del R.D. 515/89, de 21 de abril.

1.3.4. Medición definitiva y liquidación provisional de la obra

Recibidas provisionalmente las obras, se procederá inmediatamente por el Director de Ejecución de la Obra a su edición definitiva, con precisa asistencia del Contratista o de su representante. Se extenderá la oportuna certificación por triplicado que, aprobada por el Director de obra con su firma, servirá para el abono por el Promotor del saldo resultante menos la cantidad retenida en concepto de fianza.

1.3.5. Plazo de garantía

El plazo de garantía deberá estipularse en el contrato privado y, en cualquier caso, nunca deberá ser inferior a seis meses.

1.3.6. Conservación de las obras recibidas provisionalmente

Los gastos de conservación durante el plazo de garantía comprendido entre las recepciones provisional y definitiva correrán a cargo y cuenta del Contratista.

Si la instalación fuese utilizada antes de la recepción definitiva, la guardería, limpieza y reparaciones ocasionadas por el uso correrán a cargo de la Propiedad y las reparaciones por vicios de obra o por defectos en las instalaciones, serán a cargo del Contratista.

1.3.7. Recepción definitiva

La recepción definitiva se realizará después de transcurrido el plazo de garantía, en igual modo y con las mismas formalidades que la provisional. A partir de esa fecha cesará la obligación del Contratista de reparar a su cargo aquellos desperfectos inherentes a la normal conservación de las instalaciones, y quedarán sólo subsidentes todas las responsabilidades que pudieran derivar de los vicios de construcción.

1.3.8. Prórroga del plazo de garantía

Si, al proceder al reconocimiento para la recepción definitiva de la obra, no se encontrase ésta en las condiciones debidas, se aplazará dicha recepción definitiva y el director de obra indicará al contratista los plazos y formas en que deberán realizarse las obras necesarias. De no efectuarse dentro de aquellos, podrá resolverse el contrato con la pérdida de la fianza.

1.3.9. Recepciones de trabajos cuya contrata haya sido rescindida

En caso de resolución del contrato, el Contratista vendrá obligado a retirar, en el plazo fijado, la maquinaria, instalaciones y medios auxiliares, a resolver los subcontratos que tuviese concertados y a dejar la obra en condiciones de ser reanudada por otra empresa sin problema alguno.

Las obras y trabajos terminados por completo se recibirán provisionalmente con los trámites establecidos anteriormente. Transcurrido el plazo de garantía, se recibirán de manera definitiva según lo dispuesto anteriormente.

Para las obras y trabajos no determinados, pero aceptables a juicio del Director de obra, se efectuará una sola y definitiva recepción.

2. Disposiciones facultativas

2.1. Definición y atribuciones de los agentes de la edificación

Las atribuciones de los distintos agentes intervinientes en la edificación son las reguladas por la Ley 38/66 de Ordenación de la Edificación (L.O.E.).

Se definen agentes de la edificación todas las personas, físicas o jurídicas, que intervienen en el proceso de la edificación. Sus obligaciones quedan determinadas por lo dispuesto en la LOE y demás disposiciones que sean de aplicación y por el contrato que origina su intervención.

Las definiciones y funciones de los agentes que intervienen en la ejecución de la obra.

2.1.1. El Promotor

Es la persona física o jurídica, pública o privada, que individual o colectivamente decide, impulsa, programa y financia, con recursos propios o ajenos, las obras para sí o para su posterior enajenación, entrega o cesión a terceros bajo cualquier título.

Asume la iniciativa de todo el proceso de la obra, impulsando la gestión necesaria para llevar a cabo la obra inicialmente proyectada, y se hace cargo de todos los costes necesarios. Según la legislación vigente, a la figura del promotor se equiparan también las de gestor de sociedades cooperativas, comunidades de propietarios, u otras análogas que asumen la gestión económica de la obra.

Cuando las Administraciones públicas y los organismos sujetos a la legislación de contratos de las Administraciones públicas actúen como promotores, se regirán por la legislación de contratos de las Administraciones públicas y, en lo no contemplado en la misma, por las disposiciones de la LOE.

2.1.2. El Projectista

Es el agente que, por encargo del promotor y con sujeción a la normativa técnica y urbanística correspondiente, redacta el proyecto.

Podrán redactar proyectos parciales del proyecto, o partes que lo complementen, otros técnicos, de forma coordinada con el autor de éste.

Cuando el proyecto se desarrolle o complete mediante proyectos parciales u otros documentos técnicos según lo previsto en el apartado 2 del artículo 4 de la LOE, cada proyectista asumirá la titularidad de su proyecto.

2.1.3. El contratista

Es el agente que asume, contractualmente ante el promotor, el compromiso de ejecutar con medios humanos y materiales, propios o ajenos, las obras o parte de estas con sujeción al Proyecto y al Contrato de obra.

Cabe efectuar especial mención de que la ley señala como responsable explícito de los vicios o defectos constructivos al contratista general de la obra, sin perjuicio del derecho de repetición de éste hacia los subcontratistas.

2.1.4. EL Director de Obra

Es el agente que, formando parte de la dirección facultativa, dirige el desarrollo de la obra en los aspectos técnicos, estéticos, urbanísticos y medioambientales, de conformidad con el proyecto que la define, la licencia de edificación y demás autorizaciones preceptivas, y las condiciones del contrato, con el objeto de asegurar su adecuación al fin propuesto.

Podrán dirigir las obras de los proyectos parciales otros técnicos, bajo la coordinación del director de Obra.

2.1.5. El Director de la Ejecución de la Obra

Es el agente que, formando parte de la Dirección Facultativa, asume la función técnica de dirigir la Ejecución Material de la Obra y de controlar cualitativa y cuantitativamente la construcción y calidad de lo instalado. Para ello es requisito indispensable el estudio y análisis previo del proyecto de ejecución una vez redactado por el ingeniero, procediendo a solicitarle, con antelación al inicio de las obras, todas aquellas aclaraciones, subsanaciones o documentos complementarios que, dentro de su competencias y atribuciones legales, estimara necesarios para poder dirigir de manera solvente la ejecución de estas.

2.1.6. Las entidades y laboratorios de control de calidad de la instalación

Son entidades de control de calidad de la instalación aquellas capacitadas para presentar asistencia técnica en la verificación de la calidad del proyecto, de los materiales y de la ejecución de la obra y sus instalaciones de acuerdo con el proyecto y la normativa aplicable.

Son laboratorios de ensayos para el control de calidad de la instalación los capacitados para prestar asistencia técnica, mediante la realización de ensayos o pruebas de servicio de los materiales, sistemas o instalaciones de la obra.

2.1.7. Los suministradores de productos

Se consideran suministradores de productos los fabricantes, almacenistas, importadores o vendedores de productos de construcción para la instalación.

Se entiende por producto de construcción aquel que se fabrica para su incorporación permanente en una obra, incluyendo materiales, elementos semielaborados, componentes y obras o parte de las mismas, tanto terminadas como en proceso de ejecución.

2.2. La dirección facultativa

En correspondencia con la L.O.E., la Dirección Facultativa está compuesta por la Dirección de Obra y la Dirección de Ejecución de la Obra. A la Dirección Facultativa se integrará el Coordinador en materia de Seguridad y Salud en fase de ejecución de la obra, en el caso de que se haya adjudicado dicha misión a facultativo distinto de los anteriores.

Representa técnicamente los intereses del promotor durante la ejecución de la obra, dirigiendo el proceso de construcción en función de las atribuciones profesionales de cada técnico participante.

2.3. Visitas facultativas

Son las realizadas a la obra de manera conjunta o individual por cualquiera de los miembros que componen la Dirección Facultativa. La intensidad y número de visitas dependerá de los cometidos que a cada agente le son propios, pudiendo variar en función de los requerimientos específicos y de la mayor o menor exigencia presencial requerible al técnico al efecto en cada caso y según cada una de las fases de la obra.

Deberán adaptarse al proceso lógico de construcción, pudiendo los agentes ser o no coincidentes en la obra en función de la fase concreta que se esté desarrollando en cada momento y del cometido exigible a cada cual.

2.4. Obligaciones de los agentes intervinientes

Las obligaciones de los agentes que intervienen en la ejecución de la obra son las contenidas en los artículos 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15 y 16, del capítulo 11 de la L.O.E. y demás legislación aplicable.

2.4.1. El Promotor

- Ostentar sobre la propiedad la titularidad de un derecho que le faculte para construir en él.

- Facilitar la documentación e información previa necesaria para la redacción del proyecto, así como autorizar al Director de Obra, al Director de la Ejecución de la Obra y al Contratista posteriores modificaciones del mismo que fueran imprescindibles para llevar a buen fin lo proyectado.
- Elegir y contratar a los distintos agentes, con la titulación y capacitación profesional necesaria, que garanticen el cumplimiento de las condiciones legalmente exigibles para realizar en su globalidad y llevar a buen fin el objeto de
- lo promovido, en los plazos estipulados y en las condiciones de calidad exigibles mediante el cumplimiento de los requisitos básicos estipulados para los edificios.
- Gestionar y hacerse cargo de las preceptivas licencias y demás autorizaciones administrativas procedentes que, de conformidad con la normativa aplicable.
- Garantizar los daños materiales que la instalación pueda sufrir, para la adecuada protección de los intereses de los usuarios finales, en las condiciones legalmente establecidas, asumiendo la responsabilidad civil de forma personal e individualizada, tanto por actos propios como por actos de otros agentes por los que, con arreglo a la legislación vigente, se deba responder.
- El Promotor no podrá dar orden de inicio de las obras hasta que el Contratista haya redactado su Plan de Seguridad y, además, éste haya sido aprobado por el Coordinador en Materia de Seguridad y Salud en fase de Ejecución de la obra, dejando constancia expresa en el Acta de Aprobación realizada al efecto.
- Efectuar el denominado Aviso Previo a la autoridad laboral competente, haciendo constar los datos de la obra, redactándolo de acuerdo con lo especificado en el Anexo III del R.D.1627/97. Copia de este deberá exponerse en la obra de forma visible, actualizándolo si fuese necesario.
- Suscribir el acta de recepción final de las obras, una vez concluidas éstas, haciendo constar la aceptación de las obras, que podrá efectuarse con o sin reservas y que deberá abarcar la totalidad de las obras o fases completas. En el caso de hacer mención expresa a reservas para la recepción, deberán mencionarse de manera detallada las deficiencias y se deberá hacer constar el plazo en que deberán quedar subsanados los defectos observados.
- Entregar al adquirente y usuario inicial, en su caso, el manual de uso y mantenimiento de este y demás documentación de obra ejecutada, o cualquier otro documento exigible por las Administraciones competentes.

2.4.2. El Projectista

- Redactar el proyecto por encargo del Promotor, con sujeción a la normativa técnica en vigor y conteniendo la documentación necesaria para tramitar tanto la licencia de obras y demás permisos

administrativos (proyecto básico) como para ser interpretada y poder ejecutar totalmente la obra, entregando al Promotor las copias autorizadas correspondientes, debidamente visadas por su colegio profesional.

- Definir el concepto global del proyecto de ejecución con el nivel de detalle gráfico y escrito suficiente y calcular los elementos fundamentales de la instalación, en especial las posibles cimentaciones y estructuras.
- Concretar en el Proyecto el emplazamiento de cuartos de máquinas, de contadores, hornacinas, espacios asignados para subida de conductos, reservas de huecos de ventilación, alojamiento de sistemas de telecomunicación y, en general, de aquellos elementos necesarios en la instalación para facilitar las determinaciones concretas y especificaciones detalladas que son cometido de los proyectos parciales, debiendo éstos adaptarse al Proyecto de Ejecución, no pudiendo contravenirlo en modo alguno. Deberá entregarse necesariamente un ejemplar del proyecto complementario al Arquitecto antes del inicio de las obras o instalaciones correspondientes.
- Acordar con el Promotor la contratación de colaboraciones parciales de otros técnicos profesionales.
- Facilitar la colaboración necesaria para que se produzca la adecuada coordinación con los proyectos parciales exigibles por la legislación o la normativa vigente y que sea necesario incluir para el desarrollo adecuado del proceso, que deberán ser redactados por técnicos competentes, bajo su responsabilidad y suscritos por persona física. Los proyectos parciales serán aquellos redactados por otros técnicos cuya competencia puede ser distinta e incompatible con las competencias del Ingeniero y, por tanto, de exclusiva responsabilidad de éstos.
- Elaborar aquellos proyectos parciales o estudios complementarios exigidos por la legislación vigente en los que es legalmente competente para su redacción, excepto declinación expresa del Ingeniero y previo acuerdo con el Promotor, pudiendo exigir la compensación económica en concepto de cesión de derechos de autor y de la propiedad intelectual si se tuviera que entregar a otros técnicos, igualmente competentes para realizar el trabajo, documentos o planos del proyecto por él redactado, en soporte papel o informático.
- Ostentar la propiedad intelectual de su trabajo, tanto de la documentación escrita como de los cálculos de cualquier tipo, así como de los planos contenidos en la totalidad del proyecto y cualquiera de sus documentos complementarios.

2.4.3. El contratista

- Tener la capacitación profesional o titulación que habilita para el cumplimiento de las condiciones legalmente exigibles para actuar como constructor.

- Organizar los trabajos de construcción para cumplir con los plazos previstos, de acuerdo con el correspondiente Plan de Obra, efectuando las instalaciones provisionales y disponiendo de los medios auxiliares necesarios.
- Comunicar a la autoridad laboral competente la apertura del centro de trabajo en la que incluirá el Plan de Seguridad y Salud al que se refiere el artículo 7 del R.D. 1627/97 de 24 de octubre.
- Adoptar todas las medidas preventivas que cumplan los preceptos en materia de Prevención de Riesgos laborales y Seguridad y Salud que establece la legislación vigente, redactando el correspondiente Plan de Seguridad y ajustándose al cumplimiento estricto y permanente de lo establecido en el Estudio de Seguridad y Salud, disponiendo de todos los medios necesarios y dotando al personal del equipamiento de seguridad exigibles, así como cumplir las órdenes efectuadas por el Coordinador en materia de Seguridad y Salud en la fase de Ejecución de la obra.
- Supervisar de manera continuada el cumplimiento de las normas de seguridad, tutelando las actividades de los trabajadores a su cargo y, en su caso, relevando de su puesto a todos aquellos que pudieran menoscabar las condiciones básicas de seguridad personales o generales, por no estar en las condiciones adecuadas.
- Facilitar la labor de la Dirección Facultativa, suscribiendo el Acta de Replanteo, ejecutando las obras con sujeción al Proyecto de Ejecución que deberá haber examinado previamente, a la legislación aplicable, a las Instrucciones del Ingeniero Director de Obra y del Director de la Ejecución Material de la Obra, a fin de alcanzar la calidad exigida en el proyecto.
- Disponer de los medios materiales y humanos que la naturaleza y entidad de la obra impongan, disponiendo del número adecuado de oficiales, suboficiales y peones que la obra requiera en cada momento, bien por personal propio o mediante subcontratistas al efecto, procediendo a solapar aquellos oficios en la obra que sean compatibles entre sí y que permitan acometer distintos trabajos a la vez sin provocar interferencias, contribuyendo con ello a la agilización y finalización de la obra dentro de los plazos previstos.
- Ordenar y disponer en cada momento de personal suficiente a su cargo para que efectúe las actuaciones pertinentes para ejecutar las obras con solvencia, diligentemente y sin interrupción, programándolas de manera coordinada con el Ingeniero o Ingeniero técnico, Director de Ejecución Material de la Obra.
- Supervisar personalmente y de manera continuada y completa la marcha de las obras, que deberán transcurrir sin dilación y con adecuado orden y concierto, así como responder directamente de los trabajos efectuados por sus trabajadores subordinados, exigiéndoles el continuo autocontrol de los trabajos que efectúen, y ordenando la modificación de todas aquellas tareas que se presenten mal efectuadas.

- Asegurar la idoneidad de todos y cada uno de los materiales utilizados y elementos constructivos, comprobando los preparados en obra y rechazando, por iniciativa propia o por prescripción facultativa del Director de la Ejecución de la obra, los suministros de material o prefabricados que no cuenten con las garantías, documentación mínima exigible o documentos de idoneidad requeridos por las normas de aplicación, debiendo recabar de la Dirección Facultativa la información que necesite para cumplir adecuadamente su cometido.
- Dotar de material, maquinaria y utillajes adecuados a los operarios que intervengan en la obra, para efectuar adecuadamente las instalaciones necesarias y no menoscabar con la puesta en obra las características y naturaleza de los elementos constructivos que componen la instalación una vez finalizada.
- Efectuar las obras siguiendo los criterios al uso que son propios de la correcta construcción, que tiene la obligación de conocer y poner en práctica, así como de las leyes generales de los materiales o les artes, aun cuando estos criterios no estuvieran específicamente reseñados en su totalidad en la documentación de proyecto. A tal efecto, ostenta la jefatura de todo el personal que intervenga en la obra y coordina las tareas de los subcontratistas.
- Poner a disposición del Arquitecto Técnico o Aparejador los medios auxiliares y personal necesario para efectuar las pruebas pertinentes para el Control de Calidad, recabando de dicho técnico el plan a seguir en cuanto a las tomas de muestras, traslados, ensayos y demás actuaciones necesarias.
- Cuidar de que el personal de la obra guarde el debido respeto a la Dirección Facultativa.
- Auxiliar al Director de la Ejecución de la Obra en los actos de replanteo y firmar posteriormente y una vez finalizado éste, el acta correspondiente de inicio de obra, así como la de recepción final.
- Facilitar a los Arquitectos Directores de Obra, en el caso de que los hubiese, los datos necesarios para la elaboración de la documentación final de obra ejecutada.
- Ordenación de la Edificación y que, en función de su naturaleza, alcanzan períodos de 1 año (daños por defectos de terminación o acabado de las obras), 3 años (daños por defectos o vicios de elementos constructivos o de instalaciones que afecten a la habitabilidad) o 10 años (daños en cimentación o estructura que comprometan directamente la resistencia mecánica y la estabilidad de la instalación).

2.4.4. El Director de Obra

- Dirigir la obra coordinándola con el Proyecto de Ejecución, facilitando su interpretación técnica, económica y estética a los agentes intervinientes en el proceso constructivo.

- Detener la obra por causa grave y justificada, que se deberá hacer constar necesariamente en el Libro de Órdenes y Asistencias, dando cuenta inmediata al Promotor.
- Redactar las modificaciones, ajustes, rectificaciones o planos complementarios que se precisen para el adecuado desarrollo de las obras. Es facultad expresa y única la redacción de aquellas modificaciones o aclaraciones directamente relacionadas con la adecuación de la cimentación y de la estructura proyectadas a las características geotécnicas del terreno; el cálculo o recalcado del dimensionado y armado de todos y cada uno de los elementos principales y complementarios de la cimentación y de la estructura vertical y horizontal; los que afecten sustancialmente a la distribución de espacios, así como la modificación de los materiales previstos.
- Asesorar al Director de la Ejecución de la Obra en aquellas aclaraciones y dudas que pudieran acontecer para el correcto desarrollo de la misma, en lo que respecta a las interpretaciones de las especificaciones de proyecto.
- Asistir a las obras a fin de resolver las contingencias que se produzcan para asegurar la correcta interpretación y ejecución del proyecto, así como impartir las soluciones aclaratorias que fueran necesarias, consignando en el Libro de Órdenes y Asistencias las instrucciones precisas que se estimara oportunas reseñar para la correcta interpretación de lo proyectado, sin perjuicio de efectuar todas las aclaraciones y órdenes verbales que estimare oportuno.
- Firmar el Acta de replanteo o de comienzo de obra y el Certificado Final de Obra, así como firmar el visto bueno de las certificaciones parciales referidas al porcentaje de obra efectuada y, en su caso y a instancias del Promotor, la supervisión de la documentación que se le presente relativa a las unidades de obra realmente ejecutadas previa a su liquidación final, todo ello con los visados que en su caso fueran preceptivos.
- Informar puntualmente al Promotor de aquellas modificaciones sustanciales que por razones técnicas o normativas, conllevan una variación de lo construido con respecto al proyecto básico y de ejecución y que afecten o puedan afectar al contrato suscrito entre el promotor y los destinatarios finales de la instalación.
- Redactar la documentación final de obra, en lo que respecta a la documentación gráfica y escrita del proyecto ejecutado, incorporando las modificaciones efectuadas. Para ello los técnicos redactores de proyectos y/o estudios complementarios deberán obligatoriamente entregarle la documentación final en la que se haga constar el estado final de las obras y/o instalaciones por ellos redactadas, supervisadas y realmente ejecutadas, siendo responsabilidad de los firmantes la veracidad y exactitud de los documentos presentados. Al Proyecto Final de Obra se anexará el Acta de Recepción Final; la relación identificativa de los agentes que han intervenido en el proceso de edificación, incluidos todos los subcontratistas y oficios intervinientes; las instrucciones de Uso y Mantenimiento de la instalación, de conformidad con la normativa que le sea de aplicación.

Además de todas las facultades que corresponden al Arquitecto Director de Obra, expresadas en los artículos precedentes, es misión específica suya la dirección mediata, denominada alta dirección en lo que al cumplimiento de las directrices generales del proyecto se refiere, y a la adecuación de lo construido a éste. Cabe señalar expresamente que la resistencia al cumplimiento de las órdenes de los Arquitectos Directores de Obra en su labor de alta dirección se considerará como falta grave y, en caso de que, a su juicio, el incumplimiento de lo ordenado pusiera en peligro la obra o las personas que en ella trabajan, podrá recusar al Contratista y/o acudir a las autoridades judiciales, siendo responsable el Contratista de las consecuencias legales y económicas.

2.4.5. El Director de la Ejecución de la Obra

Acontece al Ingeniero. Según se establece en el Artículo 13 de la LOE y demás legislación vigente al efecto las atribuciones competencias y obligaciones que se señalan a continuación:

- La Dirección inmediata de la Obra.
- Verificar personalmente la recepción a pie de obra, previo a su acopio o colocación definitiva, de todos los productos y materiales suministrados necesarios para la ejecución de la obra, comprobando que se ajustan con precisión a las determinaciones del proyecto y a las normas exigibles de calidad, con la plena potestad de aceptación o rechazo de los mismos en caso de que lo considerase oportuno y por causa justificada, ordenando la realización de pruebas y ensayos que fueran necesarios.
- Dirigir la ejecución material de la obra de acuerdo con las especificaciones de la memoria y de los planos del Proyecto, así como, en su caso, con las instrucciones complementarias necesarias que recabara del Director de Obra.
- Anticiparse con la antelación suficiente a las distintas fases de la puesta en obra, requiriendo las aclaraciones al Arquitecto o Arquitectos Directores de Obra, si aplica que fueran necesarias y planificando de manera anticipada y continuada con el Contratista principal y los subcontratistas los trabajos a efectuar.
- Comprobar los replanteos, los materiales, hormigones y demás productos suministrados, exigiendo la presentación de los oportunos certificados de idoneidad de los mismos.
- Verificar la correcta ejecución y disposición de los elementos constructivos y de las instalaciones, extendiéndose dicho cometido a todos los elementos de cimentación y estructura horizontal y vertical, con comprobación de sus especificaciones concretas de dimensionado de elementos, tipos de viguetas y adecuación a ficha técnica homologada, diámetros nominales, longitudes de anclaje y adecuados solape y doblado de barras.

- Cumplimiento de todas las normativas que son de aplicación; a dimensiones parciales y totales de elementos, a su forma y geometría específica, así como a las distancias que deben guardarse entre ellos, tanto en horizontal como en vertical.
- Verificación de la adecuada puesta en obra de fábricas y cerramientos, a su correcta y completa trabazón y, en general, a lo que atañe a la ejecución material de la totalidad de la obra y sin excepción alguna, de acuerdo a los criterios y leyes de los materiales y de la correcta construcción y a las normativas de aplicación.
- Asistir a la obra con la frecuencia, dedicación y diligencia necesarias para cumplir eficazmente la debida supervisión de la ejecución de la misma en todas sus fases, desde el replanteo inicial hasta la total finalización del edificio, dando las órdenes precisas de ejecución al Contratista y, en su caso, a los subcontratistas. Consignar en el Libro de Órdenes y Asistencias las instrucciones precisas que considerara oportuno reseñar para la correcta ejecución material de las obras.
- Supervisar posteriormente el correcto cumplimiento de las órdenes previamente efectuadas y la adecuación de lo realmente ejecutado a lo ordenado previamente.
- Verificar el adecuado trazado de instalaciones, conductos, acometidas, redes de evacuación y su dimensionado, comprobando su idoneidad y ajuste tanto a las especificaciones del proyecto de ejecución como de los proyectos parciales, coordinando dichas actuaciones con los técnicos redactores correspondientes.
- Detener la Obra si, a su juicio, existiera causa grave y justificada, que se deberá hacer constar necesariamente en el Libro de Órdenes y Asistencias, dando cuenta inmediata a los Directores de Obra que deberán necesariamente corroborarla para su plena efectividad, y al Promotor.
- Supervisar las pruebas pertinentes para el Control de Calidad, respecto a lo especificado por la normativa vigente, en cuyo cometido y obligaciones tiene legalmente competencia exclusiva, programando bajo su responsabilidad y debidamente coordinado y auxiliado por el Contratista, las tomas de muestras, traslados, ensayos y demás actuaciones necesarias de elementos estructurales, y la eficacia de las soluciones.
- Informar con prontitud a los Directores de Obra de los resultados de los Ensayos de Control conforme se vaya teniendo conocimiento de los mismos, proponiéndole la realización de pruebas complementarias en caso de resultados adversos.
- Tras la oportuna comprobación, emitir las certificaciones parciales o totales relativas a las unidades de obra realmente ejecutadas, con los visados que en su caso fueran preceptivos.
- Colaborar activa y positivamente con los restantes agentes intervinientes, sirviendo de nexo de unión entre éstos, el Contratista, los Subcontratistas y el personal de la obra.

- Elaborar y suscribir responsablemente la documentación final de obra relativa a los resultados del Control de Calidad y, en concreto, a aquellos ensayos y verificaciones de ejecución de obra realizados bajo su supervisión.
- Suscribir conjuntamente el Certificado Final de Obra, acreditando con ello su conformidad a la correcta ejecución de las obras y a la comprobación y verificación positiva de los ensayos y pruebas realizadas.

Si se hiciera caso omiso de las órdenes efectuadas por el Ingeniero, Director de la Ejecución de las Obras, se considerará como falta grave y, en caso de que, a su juicio, el incumplimiento de lo ordenado pusiera en peligro la obra o las personas que en ella trabajan, podrá acudir a las autoridades judiciales, siendo responsable el Contratista de las consecuencias legales y económicas

2.4.6. Las entidades y laboratorios de control de calidad de la instalación

- Prestar asistencia técnica y entregar los resultados de su actividad al agente autor del encargo y, en todo caso, el director de la ejecución de las obras.
- Justificar la capacidad suficiente de medios materiales y humanos necesarios para realizar adecuadamente los trabajos contratados, en su caso, a través de la correspondiente acreditación oficial otorgada por las Comunidades Autónomas con competencia en la materia.

2.4.7. Los suministradores de productos

- Realizar las entregas de los productos de acuerdo con las especificaciones del pedido, respondiendo de su origen, identidad y calidad, así como del cumplimiento de las exigencias que, en su caso, establezca la normativa técnica aplicable.
- Facilitar, cuando proceda, las instrucciones de uso y mantenimiento de los productos suministrados, así como las garantías de calidad correspondientes, para su inclusión en la documentación de la obra ejecutada.

2.4.8. Los propietarios y los usuarios

Son obligaciones de los propietarios conservar en buen estado la instalación mediante un adecuado uso y mantenimiento, así como recibir, conservar y transmitir la documentación de la obra ejecutada y los seguros y garantías con que ésta cuente. Son obligaciones de los usuarios sean o no propietarios,

la utilización adecuada de la instalación o de parte de la misma de conformidad con las instrucciones de uso y mantenimiento contenidas en la documentación de la obra ejecutada.

2.5. Documentación final de la obra

Una vez finalizada la obra, el proyecto con la incorporación, en su caso, de las modificaciones debidamente aprobadas, será facilitado al promotor por el Director de Obra para la formalización de los correspondientes trámites administrativos.

A dicha documentación se adjuntará, al menos, el acta de recepción, la relación identificativa de los agentes que han intervenido durante el proceso de edificación, así como la relativa a las instrucciones de uso y mantenimiento de la instalación, de conformidad con la normativa que le sea de aplicación

Toda la documentación a que hacen referencia los apartados anteriores será entregada a los usuarios finales.

- Los propietarios y los usuarios

Son obligaciones de los propietarios conservar en buen estado la instalación mediante un adecuado uso y mantenimiento, así como recibir, conservar y transmitir la documentación de la obra ejecutada y los seguros y garantías con que ésta cuente.

Son obligaciones de los usuarios sean o no propietarios, la utilización adecuada de los edificios o de parte de estos de conformidad con las instrucciones de uso y mantenimiento contenidas en la documentación de la obra ejecutada.

3. Disposiciones económicas

3.1. Definición

Las condiciones económicas fijan el marco de relaciones económicas para el abono y recepción de la obra. Tienen un carácter subsidiario respecto al contrato de obra, establecido entre las partes que intervienen, Promotor y Contratista, que es en definitiva el que tiene validez.

3.2. Contrato de Obra

Se aconseja que se firme el contrato de obra, entre el Promotor y el Contratista, antes de iniciarse las obras, evitando en lo posible la realización de la obra por administración. A la Dirección Facultativa

(Director de Obra y Director de Ejecución de la Obra) se le facilitará una copia del contrato de obra, para poder certificar en los términos pactados.

Sólo se aconseja contratar por administración aquellas partidas de obra irrelevantes y de difícil cuantificación, o cuando se desee un acabado muy esmerado.

El contrato de obra deberá prever las posibles interpretaciones y discrepancias que pudieran surgir entre las partes, así como garantizar que la Dirección Facultativa pueda, de hecho, COORDINAR, DIRIGIR y CONTROLAR la obra, por lo que es conveniente que se especifiquen y determinen con claridad, como mínimo, los siguientes puntos:

- Documentos para aportar por el Contratista.
- Condiciones de ocupación del edificio e inicio de las obras.
- Determinación de los gastos de enganches y consumos.
- Responsabilidades y obligaciones del Contratista: Legislación laboral.
- Responsabilidades y obligaciones del Promotor.
- Presupuesto del Contratista.
- Revisión de precios (en su caso).
- Forma de pago: Certificaciones.
- Retenciones en concepto de garantía (nunca menos del 5%).
- Plazos de ejecución: Planning.
- Retraso de la obra: Penalizaciones.
- Recepción de la obra: Provisional y definitiva.
- Litigio entre las partes.

Dado que este Pliego de Condiciones Económicas es complemento del contrato de obra, en caso de que no exista contrato de obra alguno entre las partes se le comunicará a la Dirección Facultativa, que pondrá a disposición de las partes el presente Pliego de Condiciones Económicas que podrá ser usado como base para la redacción del correspondiente contrato de obra.

3.3. Criterio general

Todos los agentes que intervienen en el proceso de la construcción, definidos en la Ley 38/1999 de Ordenación de la Edificación (L.O.E.), tienen derecho a percibir puntualmente las cantidades devengadas por su correcta actuación con arreglo a las condiciones contractualmente establecidas,

pudiendo exigirse recíprocamente las garantías suficientes para el cumplimiento diligente de sus obligaciones de pago.

3.4. Fianzas

El Contratista presentará una fianza con arreglo al procedimiento que se estipule en el contrato de obra:

3.4.1. Ejecución de trabajos con cargo a la fianza

Si el contratista se negase a hacer por su cuenta los trabajos precisos para ultimar la obra en las condiciones contratadas, el Director de Obra, en nombre y representación del Promotor, los ordenará ejecutar a un tercero, o podrá realizarlos directamente por administración, abonando su importe con la fianza depositada, sin perjuicio de las acciones a que tenga derecho el Promotor, en el caso de que el importe de la fianza no bastase para cubrir el importe de los gastos efectuados en las unidades de obra que no fuesen de recibo.

3.4.2. Devolución de las fianzas

La fianza recibida será devuelta al Contratista en un plazo establecido en el contrato de obra, una vez firmada el Acta de Recepción Definitiva de la obra. El Promotor podrá exigir que el Contratista le acredite la liquidación y finiquito de sus deudas causadas por la ejecución de la obra, tales como salarios, suministros y subcontratos.

3.4.3. Devolución de la fianza en el caso de efectuarse recepciones parciales

Si el Promotor, con la conformidad del Director de Obra, accediera a hacer recepciones parciales, tendrá derecho el Contratista a que se le devuelva la parte proporcional de la fianza.

3.5. De los precios

El objetivo principal de la elaboración del presupuesto es anticipar el coste del proceso de construir la obra. Descompondremos el presupuesto en unidades de obra, componente menor que se contrata y certifica por separado, y basándonos en esos precios, calcularemos el presupuesto.

3.5.1. Precio básico

Es el precio por unidad (Ud., m, kg, etc.) de un material dispuesto a pie de obra, (incluido su transporte a obra, descarga en obra, embalajes, etc.) o el precio por hora de la maquinaria y de la mano de obra.

3.5.2. Precio unitario

Es el precio de una unidad de obra que obtendremos como suma de los siguientes costes:

- Costes directos: calculados como suma de los productos "precio básico x cantidad" de la mano de obra, maquinaria y materiales que intervienen en la ejecución de la unidad de obra.
- Medios auxiliares: Costes directos complementarios, calculados en forma porcentual como porcentaje de otros componentes, debido a que representan los costes directos que intervienen en la ejecución de la unidad de obra y que son de difícil cuantificación. Son diferentes para cada unidad de obra.
- Costes indirectos: aplicados como un porcentaje de la suma de los costes directos y medios auxiliares, igual para cada unidad de obra debido a que representan los costes de los factores necesarios para la ejecución de la obra que no se corresponden a ninguna unidad de obra en concreto.

En relación a la composición de los precios, el vigente Reglamento general de la Ley de Contratos de las Administraciones Públicas (Real Decreto 1098/2001, de 12 de octubre) establece que la composición y el cálculo de los precios de las distintas unidades de obra se base en la determinación de los costes directos e indirectos precisos para su ejecución, sin incorporar, en ningún caso, el importe del Impuesto sobre el Valor Añadido que pueda gravar las entregas de bienes o prestaciones de servicios realizados.

Considera costes directos:

- La mano de obra que interviene directamente en la ejecución de la unidad de obra.
- Los materiales, a los precios resultantes a pie de obra, que quedan integrados en la unidad de que se trate o que sean necesarios para su ejecución.
- Los gastos de personal, combustible, energía, etc., que tengan lugar por el accionamiento o funcionamiento de la maquinaria e instalaciones utilizadas en la ejecución de la unidad de obra.
- Los gastos de amortización y conservación de la maquinaria e instalaciones anteriormente citadas.

Deben incluirse como costes indirectos:

- Los gastos de instalación de oficinas a pie de obra, comunicaciones, edificación de almacenes, talleres, pabellones temporales para obreros, laboratorio, etc., los del personal técnico y administrativo adscrito exclusivamente a la obra y los imprevistos.

Todos estos gastos, excepto aquéllos que se reflejen en el presupuesto valorados en unidades de obra o en partidas alzadas, se cifrarán en un porcentaje de los costes directos, igual para todas las unidades de obra, que adoptará, en cada caso, el autor del proyecto a la vista de la naturaleza de la obra proyectada, de la importancia de su presupuesto y de su previsible plazo de ejecución.

Las características técnicas de cada unidad de obra, en las que se incluyen todas las especificaciones necesarias para su correcta ejecución, se encuentran en el apartado de 'Prescripciones en cuanto a la Ejecución por Unidad de Obra.', junto a la descripción del proceso de ejecución de la unidad de obra.

Si en la descripción del proceso de ejecución de la unidad de obra no figurase alguna operación necesaria para su correcta ejecución, se entiende que está incluida en el precio de la unidad de obra, por lo que no supondrá cargo adicional o aumento de precio de la unidad de obra contratada.

Para mayor aclaración, se exponen algunas operaciones o trabajos, que se entiende que siempre forman parte del proceso de ejecución de las unidades de obra:

- El transporte y movimiento vertical y horizontal de los materiales en obra, incluso carga y descarga de los camiones.
- Eliminación de restos, limpieza final y retirada de residuos a vertedero de obra.
- Transporte de escombros sobrantes a vertedero autorizado.
- Montaje, comprobación y puesta a punto.
- Las correspondientes legalizaciones y permisos en instalaciones.
- Maquinaria, andamiajes y medios auxiliares necesarios.

Trabajos que se considerarán siempre incluidos y para no ser reiterativos no se especifican en cada una de las unidades de obra.

3.5.3. Presupuesto de ejecución del material (PEM)

Es el resultado de la suma de los precios unitarios de las diferentes unidades de obra que la componen.

Se denomina Presupuesto de Ejecución Material al resultado obtenido por la suma de los productos del número de cada unidad de obra por su precio unitario y de las partidas alzadas. Es decir, el coste de la obra sin incluir los gastos generales, el beneficio industrial y el impuesto sobre el valor añadido.

3.5.4. Precios contradictorios

Sólo se producirán precios contradictorios cuando el Promotor, por medio del Director de Obra, decida introducir unidades o cambios de calidad en alguna de las previstas, o cuando sea necesario afrontar alguna circunstancia imprevista.

El Contratista siempre estará obligado a efectuar los cambios indicados.

A falta de acuerdo, el precio se resolverá contradictoriamente entre el Director de Obra y el Contratista antes de comenzar la ejecución de los trabajos y en el plazo que determine el contrato de obra o, en su defecto, antes de quince días hábiles desde que se le comunique fehacientemente al Director de Obra. Si subsiste la diferencia, se acudirá, en primer lugar, al concepto más análogo dentro del cuadro de precios del proyecto y, en segundo lugar, al banco de precios de uso más frecuente en la localidad.

Los contradictorios que hubiese se referirán siempre a los precios unitarios de la fecha del contrato de obra. Nunca se tomará para la valoración de los correspondientes precios contradictorios la fecha de la ejecución de la unidad de obra en cuestión.

3.5.5. Reclamación de aumento de precios

Si el Contratista, antes de la firma del contrato de obra, no hubiese hecho la reclamación u observación oportuna, no podrá bajo ningún pretexto de error u omisión reclamar aumento de los precios fijados en el cuadro correspondiente del presupuesto que sirva de base para la ejecución de las obras.

3.5.6. Formas tradicionales de medir o de aplicar los precios

En ningún caso podrá alegar el Contratista los usos y costumbres locales respecto de la aplicación de los precios o de la forma de medir las unidades de obra ejecutadas. Se estará a lo previsto en el Presupuesto y en el criterio de medición en obra recogido en el Pliego.

3.5.7. De la revisión de los precios contratados

El presupuesto presentado por el Contratista se entiende que es cerrado, por lo que no se aplicará revisión de precios.

Sólo se procederá a efectuar revisión de precios cuando haya quedado explícitamente determinado en el contrato de obra entre el Promotor y el Contratista.

3.5.8. Acopio de materiales

El Contratista queda obligado a ejecutar los acopios de materiales o aparatos de obra que el Promotor ordene por escrito.

Los materiales acopiados, una vez abonados por el propietario, son de la exclusiva propiedad de éste, siendo el Contratista responsable de su guarda y conservación.

3.6. Obras de administración

Se denominan "Obras por administración" aquellas en las que las gestiones que se precisan para su realización las lleva directamente el Promotor, bien por sí mismo, por un representante suyo o por mediación de un Contratista.

Las obras por administración se clasifican en dos modalidades:

- Obras por administración directa.
- Obras por administración delegada o indirecta.

Según la modalidad de contratación, en el contrato de obra se regulará:

- Su liquidación.
- El abono al Contratista de las cuentas de administración delegada.
- Las normas para la adquisición de los materiales y aparatos.
- Responsabilidades del Contratista en la contratación por administración en general y, en particular, la debida al bajo rendimiento de los obreros.

3.7. Valoración y abono de los trabajos

3.7.1. Forma y plazos de abono de las obras

Se realizará por certificaciones de obra y se recogerán las condiciones en el contrato de obra establecido entre las partes que intervienen (Promotor y Contratista) que, en definitiva, es el que tiene validez.

Los pagos se efectuarán por la propiedad en los plazos previamente establecidos el contrato de obra, y su importe corresponderá precisamente al de las certificaciones de la obra conformadas por el Director de Ejecución de la Obra, en virtud de las cuáles se verifican aquéllos.

El Director de Ejecución de la Obra realizará, en la forma y condiciones que establezca el criterio de medición en obra incorporado en las Prescripciones en cuanto a la Ejecución por unidad de obra, la medición de las unidades de obra ejecutadas durante el período de tiempo anterior, pudiendo el Contratista presenciar la realización de tales mediciones.

Para las obras o partes de obra que, por sus dimensiones y características, hayan de quedar posterior y definitivamente ocultas, el contratista está obligado a avisar al Director de Ejecución de la Obra con la suficiente antelación, a fin de que éste pueda realizar las correspondientes mediciones y toma de datos, levantando los planos que las definan, cuya conformidad suscribirá el Contratista.

A falta de aviso anticipado, cuya existencia corresponde probar al Contratista, queda este obligado a aceptar las decisiones del Promotor sobre el particular.

3.7.2. Relaciones valoradas y certificaciones

En los plazos fijados en el contrato de obra entre el Promotor y el Contratista, éste último formulará una relación valorada de las obras ejecutadas durante las fechas previstas, según la medición practicada por el Director de Ejecución de la Obra.

Las certificaciones de obra serán el resultado de aplicar, a la cantidad de obra realmente ejecutada, los precios contratados de las unidades de obra. Sin embargo, los excesos de obra realizada en unidades, que sean imputables al Contratista, no serán objeto de certificación alguna.

Los pagos se efectuarán por el Promotor en los plazos previamente establecidos, y su importe corresponderá al de las certificaciones de obra, conformadas por la Dirección Facultativa. Tendrán el carácter de documento y entregas a buena cuenta, sujetas a las rectificaciones y variaciones que se deriven de la Liquidación Final, no suponiendo tampoco dichas certificaciones parciales la aceptación, la aprobación, ni la recepción de las obras que comprenden.

Las relaciones valoradas contendrán solamente la obra ejecutada en el plazo a que la valoración se refiere. Si la Dirección Facultativa lo exigiera, las certificaciones se extenderán a origen.

3.7.3. Mejora de obras libremente ejecutadas

Cuando el Contratista, incluso con la autorización del Director de Obra, emplease materiales de más esmerada preparación o de mayor tamaño que el señalado en el proyecto o sustituyese una clase de fábrica por otra que tuviese asignado mayor precio, o ejecutase con mayores dimensiones cualquier parte de la obra, o, en general, introdujese en ésta y sin solicitársela, cualquier otra modificación que sea beneficiosa a juicio de la Dirección Facultativa, no tendrá derecho más que al abono de lo que

podiera corresponderle en el caso de que hubiese construido la obra con estricta sujeción a la proyectada y contratada o adjudicada.

3.7.4. Abono de trabajos presupuestados con partida alzada

El abono de los trabajos presupuestados en partida alzada se efectuará previa justificación por parte del Contratista. Para ello, el Director de Obra indicará al Contratista, con anterioridad a su ejecución, el procedimiento que ha de seguirse para llevar dicha cuenta.

3.7.5. Abono de trabajos ejecutados durante el plazo de garantía

Cuando fuese preciso efectuar cualquier tipo de trabajo de índole especial u ordinaria que, por no estar contratado, no sea de cuenta del Contratista, y si no se contratasen con tercera persona, tendrá el Contratista la obligación de realizarlos y de satisfacer los gastos de toda clase que ocasionen, los cuales le serán abonados por la Propiedad por separado y en las condiciones que se estipulen en el contrato de obra.

3.7.6. Abono de trabajos ejecutados después del plazo de garantía

Efectuada la recepción provisional, y si durante el plazo de garantía se hubieran ejecutado trabajos cualesquiera, para su abono se procederá así:

- Si los trabajos que se realicen estuvieran especificados en el Proyecto, y sin causa justificada no se hubieran realizado por el Contratista a su debido tiempo, y el Director de obra exigiera su realización durante el plazo de garantía, serán valorados a los precios que figuren en el Presupuesto y abonados de acuerdo con lo establecido en el presente Pliego de Condiciones, sin estar sujetos a revisión de precios.
- Si se han ejecutado trabajos precisos para la reparación de desperfectos ocasionados por el uso, por haber sido éste utilizado durante dicho plazo por el Promotor, se valorarán y abonarán a los precios del día, previamente acordados.
- Si se han ejecutado trabajos para la reparación de desperfectos ocasionados por deficiencia de la construcción o de la calidad de los materiales, nada se abonará por ellos al Contratista.

3.8. Indemnizaciones mutuas

3.8.1. Indemnización por retraso del plazo de terminación de las obras

Si, por causas imputables al Contratista, las obras sufrieran un retraso en su finalización con relación al plazo de ejecución previsto, el Promotor podrá imponer al Contratista, con cargo a la última certificación, las penalizaciones establecidas en el contrato, que nunca serán inferiores al perjuicio que pudiera causar el retraso de la obra.

3.8.2. Demora de los pagos por parte del promotor

Se regulará en el contrato de obra las condiciones a cumplir por parte de ambos.

3.9. Varios

3.9.1. Mejoras, aumentos y/o reducciones de obra

Sólo se admitirán mejoras de obra, en el caso que el Director de Obra haya ordenado por escrito la ejecución de los trabajos nuevos o que mejoren la calidad de los contratados, así como de los materiales y maquinaria previstos en el contrato.

Sólo se admitirán aumentos de obra en las unidades contratadas, en el caso que el Director de Obra haya ordenado por escrito la ampliación de las contratadas como consecuencia de observar errores en las mediciones de proyecto.

En ambos casos será condición indispensable que ambas partes contratantes, antes de su ejecución o empleo, convengan por escrito los importes totales de las unidades mejoradas, los precios de los nuevos materiales o maquinaria ordenados emplear y los aumentos que todas estas mejoras o aumentos de obra supongan sobre el importe de las unidades contratadas.

Se seguirán el mismo criterio y procedimiento, cuando el Director de Obra introduzca innovaciones que supongan una reducción en los importes de las unidades de obra contratadas

3.9.2. Unidades de obra defectuosas

Las obras defectuosas no se valorarán.

3.9.3. Seguro de obras

El contratista está obligado a asegurar la obra contratada durante todo el tiempo que dure su ejecución, hasta la recepción definitiva.

3.9.4. Conservación de la obra

El Contratista está obligado a conservar la obra contratada durante todo el tiempo que dure su ejecución, hasta la recepción definitiva

3.9.5. Uso por el Contratista de edificio o bienes del Promotor

No podrá el Contratista hacer uso de edificio o bienes del Promotor durante la ejecución de las obras sin el consentimiento de este.

Al abandonar el Contratista la instalación, tanto por buena terminación de las obras, como por resolución del contrato, está obligado a dejarlo en buen estado en el plazo que se estipule en el contrato de obra.

3.10. Retenciones en concepto de garantía

Del importe total de las certificaciones se descontará un porcentaje, que se retendrá en concepto de garantía. Este valor no deberá ser nunca menor del cinco por cien (5%) y responderá de los trabajos mal ejecutados y de los perjuicios que puedan ocasionarle al Promotor.

Esta retención en concepto de garantía quedará en poder del Promotor durante el tiempo designado como periodo de garantía, pudiendo ser dicha retención, "en metálico" o mediante un aval bancario que garantice el importe total de la retención.

Si el Contratista se negase a hacer por su cuenta los trabajos precisos para ultimar la obra en las condiciones contratadas, el Director de Obra, en representación del Promotor, los ordenará ejecutar a un tercero, o podrá realizarlos directamente por administración, abonando su importe con la fianza depositada, sin perjuicio de las acciones a que tenga derecho el Promotor, en el caso de que el importe de la fianza no bastase para cubrir el importe de los gastos efectuados en las unidades de obra que no fuesen de recibo.

La fianza retenida en concepto de garantía será devuelta al Contratista en el plazo estipulado en el contrato, una vez firmada el Acta de Recepción Definitiva de la obra. El promotor podrá exigir que el Contratista le acredite la liquidación y finiquito de sus deudas atribuibles a la ejecución de la obra, tales como salarios, suministros o subcontratos.

3.11. Plazos de ejecución: Planning de la obra

En el contrato de obra deberán figurar los plazos de ejecución y entregas, tanto totales como parciales. Además, será conveniente adjuntar al respectivo contrato un Planning de la ejecución de la obra donde figuren de forma gráfica y detallada la duración de las distintas partidas de obra que deberán conformar las partes contratantes.

3.12. Liquidación económica de las obras

Simultáneamente al libramiento de la última certificación, se procederá al otorgamiento del Acta de Liquidación Económica de las obras, que deberán firmar el Promotor y el Contratista. En este acto se dará por terminada la obra y se entregarán, en su caso, los manuales, los correspondientes boletines debidamente cumplimentados de acuerdo a la Normativa Vigente, así como los proyectos Técnicos y permisos de las instalaciones contratadas.

Dicha Acta de Liquidación Económica servirá de Acta de Recepción Provisional de las obras, para lo cual será conformada por el Promotor, el Contratista, el Director de Obra y el Director de Ejecución de la Obra, quedando desde dicho momento la conservación y custodia de las mismas a cargo del Promotor.

La citada recepción de las obras, provisional y definitiva, queda regulada según se describe en las Disposiciones Generales del presente Pliego.

3.13. Liquidación final de la obra

Entre el Promotor y Contratista, la liquidación de la obra deberá hacerse de acuerdo con las certificaciones conformadas por la Dirección de Obra. Si la liquidación se realizara sin el visto bueno de la Dirección de Obra, ésta sólo mediará en caso de desavenencia o desacuerdo, en el recurso ante los Tribunales.

2) Pliego de condiciones técnicas particulares

1. Objeto

En este Pliego se establecen las prescripciones técnicas y particulares que, además de las cláusulas administrativas y económicas que regulan el correspondiente contrato, habrán de regir para la ejecución de las obras del presente proyecto “Diseño de un tratamiento terciario especializado en la eliminación de boro de aguas residuales de procedencia industrial cerámica”.

Este presente Pliego prevalecerá sobre todos los demás documentos del Proyecto, incluso sobre el Pliego de Condiciones Técnicas Generales caso de producirse discrepancias entre ellos.

2. Prescripciones sobre los materiales

2.1. Condiciones técnicas generales

Los materiales deberán cumplir las condiciones que se especifiquen sobre ellos en los documentos que componen el Proyecto. Asimismo sus calidades serán acordes con las distintas normas que sobre ellos estén publicadas y que tendrán un carácter de complementariedad a este apartado del Pliego, citándose como referencia:

- Normas MV.
- Normas UNE.
- Normas DIN.
- Normas ASTM.
- Normas NTE.
- Instrucción EHE-08 (REAL DECRETO 1247/2008, del 18 Julio, por el que se aprueba la instrucción de hormigón estructural (EHE-08)).
- Normas AEONOR.
- PIET-70.

El Contratista será el responsable de asegurarse de que los materiales que emplea cumplan con las condiciones exigidas, independientemente del nivel de control de calidad que la Dirección Facultativa establezca para la aceptación de los mismo. Por lo tanto, será el propio Constructor o Contratista quien deba comunicar a los suministradores de los productos las calidades mínimas que se exigen para los

distintos materiales. Asimismo, el propio Contratista comunicará con suficiente antelación a la Dirección Facultativa la procedencia y características de los materiales escogidos para que ésta determine su aceptación o rechazo. El hecho de que el Contratista subcontrate cualquier partida de la obra o instalación no le exime de su responsabilidad en cuanto a la calidad de los materiales.

Aquellos materiales que no cumplan con las condiciones exigidas o con la aprobación de la Dirección Facultativa, aún después de colocarlos en la obra, deberán ser sustituidos corriendo el Contratista con los gastos que ello ocasionase.

2.1.1. Calidad de los materiales

Tendrán preferencia en cuanto a su aceptabilidad, aquellos materiales que tengan asignado el Documento de Idoneidad Técnica emitido por Organismos Técnicos reconocidos que avalen sus cualidades. De tal manera que todos los materiales a emplear en la presente obra serán de primera calidad y reunirán las condiciones exigidas.

Es obligación del Director de la Ejecución de la Obra verificar si los productos que entran en la obra están afectados por el cumplimiento del sistema del marcado CE y, en caso de ser así, si cumplen las condiciones establecidas en el Real Decreto 1630/1992 por el que se traspone a nuestro ordenamiento legal la Directiva de Productos de Construcción 89/106/CEE.

2.1.2. Pruebas y ensayos de los materiales

Todos los materiales que se recogen en este Proyecto podrán ser sometidos a los análisis y pruebas que se crean necesarios para acreditar su calidad y fiabilidad. Cualquier prueba o ensayo adicional que se crea conveniente realizar debe estar aprobado por la Dirección de las obras. Los costes procedentes de las pruebas corren a cargo del Constructor, sin que sea necesario presupuestarlo de manera específica.

2.1.3. Materiales no consignados en los pliegos

Todo material que no fuera consignado ni descrito en el proyecto que dieran lugar a precios contradictorios reunirán las condiciones de calidad necesarias, a juicio de la Dirección Facultativa no teniendo el contratista derecho a reclamación alguna por estas condiciones exigidas.

2.2. Materiales para hormigones y morteros

Se define como hormigones los productos formados principalmente por una mezcla de cemento, agua, árido fino y grueso y eventualmente productos de adición que mejoran las propiedades estructurales y mecánicas del hormigón. La mezcla al fraguar adquiere una notable resistencia, la cual variará en función de su composición.

Por otra parte, las obras de hormigón en masa o armado son aquellas en las cuales se utiliza el hormigón como material principal, reforzado, en el caso de hormigón armado, mediante armaduras de acero que le aportan al hormigón unas propiedades mecánicas mejores.

2.2.1. Aguas

En general podrán ser utilizadas, tanto para el amasado como para el curado del hormigón en obras, todas las aguas mencionadas como aceptables por la práctica. Cuando no se posean antecedentes de su utilización o en caso de duda, el agua utilizada deberá cumplir con las condiciones exigidas en Real Decreto 1247/2008, de 18 julio, por el que se aprueba la instrucción de hormigón estructural (EHE-08). Por lo tanto, el agua deberá cumplir las siguientes condiciones:

- Acidez tal que el pH sea mayor de 5, tal y como indica la norma UNE 7234:71.
- Sustancias solubles, menos de quince gramos por litro (15 gr./l.), según norma UNE 7130:58.
- Que el contenido de sulfatos expresados en S04 sea inferior a un gramo por litro (1 gr.A.) según ensayo de norma UNE 7131:58.
- Que posean ion cloro para hormigón con armaduras en proporciones menores de 6 gr./l., según norma UNE 7178:60.
- Grasas o aceites de cualquier clase, menos de quince gramos por litro (15 gr./l.). (UNE 7235).
- Carencia absoluta de azúcares o carbohidratos según ensayo de norma UNE 7132:58.
- Demás prescripciones de la EHE.

2.2.2. Áridos

Se entiende por "arena" o "árido fino", la fracción árida del material que pasa por un tamiz de 5 mm. de luz de malla (tamiz 5 UNE 77050); por "grava" o "árido grueso" el que resulta detenido por dicho tamiz; y por "árido total" (o simplemente "árido" cuando no hay lugar a confusiones), aquel que, de por sí o por mezcla, posee las proporciones de arena y grava adecuadas para fabricar el hormigón necesario en el caso particular que se considere. Las limitaciones en cuanto al tamaño cumplirán las condiciones señaladas en la instrucción EHE.

La naturaleza de los áridos y su preparación serán tales que permitan garantizar la adecuada resistencia y durabilidad del hormigón, así como el resto de las características que se exijan en este Pliego de Condiciones.

Como áridos para la fabricación de hormigones pueden emplearse arenas y gravas existentes en yacimientos naturales, machacados u otros productos cuyo empleo no se encuentre sancionado por la práctica o no resulte aconsejable como consecuencia de estudios realizados en un laboratorio oficial. En cualquier caso se deberán cumplir las condiciones del Real Decreto 1247/2008, de 18 julio, por el que se aprueba la instrucción de hormigón estructural (EHE-08).

Cuando no se tengan antecedentes sobre la utilización de los áridos disponibles, o se vayan a emplear para otras aplicaciones distintas de las ya sancionadas por la práctica, se realizarán ensayos de identificación mediante análisis mineralógicos, petrográficos, físicos o químicos, según convengan a cada caso.

En el caso de utilizar escorias siderúrgicas como árido, se comprobará previamente que son estables, es decir que no contienen silicatos inestables ni compuestos ferrosos. Esta comprobación se efectuará con arreglo al método de ensayo UNE 7.243. Por último, se prohíbe el empleo de áridos que contengan sulfuros oxidables.

2.2.3. Aditivos

Los aditivos a emplear en la producción de morteros y hormigones son aquellos productos sólidos o líquidos, excepto cemento, áridos o agua que mezclados durante el amasado modifiquen o mejoren las características del mortero u hormigón, en especial en lo referentes al fraguado, endurecimiento, plasticidad e inclusión de aire. Todos los aditivos que se empleen para la confección de hormigones deberán cumplir las condiciones que se exigen en la Instrucción EHE.

Para la utilización de aditivos se establecerán los siguientes límites:

Si se emplea cloruro cálcico como acelerador, su dosificación será igual o menos del dos por ciento (2%) en peso del cemento, y si se trata de hormigonar con temperaturas muy bajas, del tres y medio por ciento (3,5%) del peso del cemento.

Si se usan aireantes para hormigones normales su proporción será tal que la disminución de resistencia a compresión producida por la inclusión de aireantes sea inferior al veinte por ciento (20%). En ningún caso la proporción de aireantes será mayor del cuatro por ciento (4%) del peso en cemento.

En caso de empleo de colorantes, la proporción será inferior al diez por ciento del peso del cemento, estando totalmente prohibido el empleo de colorantes orgánicos.

2.2.4. Cementos

Se entiendo como tal, un aglomerante, hidráulico que responda a alguna de las definiciones del Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para la Recepción de cementos. R.C. 03. B.O.E. 16.01.04.

Podrá almacenarse en sacos o a granel. En el primer caso, el almacén protegerá contra la intemperie y la humedad, tanto del suelo como de las paredes. Si se almacenará a granel, no podrán mezclarse en el mismo sitio cementos de distintas calidades y procedencias.

Se exigirá al contratista la realización de ensayos que demuestren de modo satisfactorio que los cementos cumplen las condiciones exigidas. Dichos ensayos deberán ser realizados en laboratorios homologados oficiales. Los métodos de ensayo serán los detallados en el citado “Pliego General de Condiciones para la Recepción de Conglomerantes Hidráulicos.” Será necesario adjuntar los resultados de los ensayos a los documentos en el que se especifique el tipo, clase y categoría a que pertenece el conglomerante. Las partidas de cemento defectuoso serán retiradas de la obra en el plazo máximo de 8 días.

2.3. Hormigones

Se exigirá al contratista que los hormigones se ajusten totalmente a las dosificaciones que se fijan en el correspondiente presupuesto de obra civil y su cantidad será la necesaria para que no se originen coqueas en la masa de hormigón mermando su resistencia.

Deberá cumplir El Real Decreto 1247/2008, de 18 de julio, por el que se aprueba la “Instrucción de hormigón estructural (EHE-08)”. El control de calidad del hormigón y de sus materiales componentes se ajustará a lo previsto en el capítulo IX de Instrucción EHE-2008.

La resistencia característica a compresión del hormigón se comprobará mediante ensayos de control a nivel normal. Durante la ejecución de la obra se extraerán probetas con el objetivo de observar características de apisonado y curado análogas a las masas de hormigón de la obra. Como en todo ensayo de resistencia del hormigón, las probetas se rompen a los 28 días registrando el valor de resistencia obtenido.

Si el hormigón de la obra se considera defectuoso el contratista se verá obligado a demoler la parte de la obra que se le indique por parte de la Dirección Facultativa. Esto no será motivo de prórroga del plazo de ejecución de la obra y el propio contratista correrá a cargo de los gastos.

Por último, el control del hormigón durante la ejecución de las obras (fraguado, curado...) se ajustará a lo previsto en la Instrucción EHE-2008.

2.4. Aceros

2.4.1. Acero corrugado para armar

Este tipo de acero en forma de barras corrugadas será empleado para armar el hormigón. Estos aceros vendrán marcados de fábrica con señales indelebles para evitar confusiones en su empleo. No presentarán ovalizaciones, grietas, sopladuras, ni mermas de sección superiores al cinco por ciento (5%).

Aquellos que sean empleados en elementos estructurales de hormigón armado deberán cumplir las condiciones que se detallan en la Instrucción EHE-08. El módulo de elasticidad será igual o mayor de dos millones cien mil kilogramos por centímetro cuadrado ($2.100.000 \text{ kg/cm}^2$). Entendiendo por límite elástico la mínima tensión capaz de producir una deformación permanente de dos décimas por ciento (0.2%). Se prevé el acero de límite elástico 4.200 kg/cm^2 , cuya carga de rotura no será inferior a cinco mil doscientos cincuenta (5.250 kg/cm^2) Esta tensión de rotura es el valor de la ordenada máxima del diagrama tensión deformación.

2.4.2. Acero laminado

El acero empleado en los perfiles de acero laminado será de los tipos establecidos por la norma UNE EN 10025 “Productos laminados en caliente de acero no aleado, para construcciones metálicas de uso general”. también se podrán utilizar los aceros establecidos por las normas UNE EN 10210-1:1994 relativa a perfiles huecos para la construcción, acabados en caliente, de acero no aleado de grano fino, y en la UNE EN 10219-1:1998, relativa a secciones huecas de acero estructural conformadas en frío. En todo caso, se tendrá, siempre en cuenta las especificaciones del Artículo 4.2 el DB SE-A Seguridad Estructural Acero del CTE.

Será indispensable que los perfiles vengán con su correspondiente identificador con señales indelebles para evitar confusiones, del mismo modo que ocurre con las barras de acero para armar. No presentarán ovalizaciones, grietas, sopladuras, ni mermas de sección superiores al cinco por ciento (5%).

2.5. Instalaciones eléctricas

Los materiales empleados en la instalación eléctrica deberán cumplir las prescripciones técnicas que dictan las normas internacionales C.B.I, los reglamentos en vigor para las instalaciones eléctricas y las normas de la Compañía Suministradora de Energía.

Los materiales empleados en este proyecto serán de calidad máxima y reunirán las condiciones necesarias exigidas en el Reglamento Electrotécnico de Baja y Alta Tensión, así como las demás disposiciones vigentes que determinan las características mínimas de los materiales eléctricos de construcción.

Todos los equipos y materiales eléctricos se someterán a pruebas que acreditarán la calidad de estos. Dichas pruebas correrán a cargo de la Contrata, así como el gasto que supondrá la sustitución de un material defectuoso ya instalado en la obra.

Todo material perteneciente a la instalación eléctrica que no fuera consignado ni descrito en el proyecto que dieran lugar a precios contradictorios reunirán las condiciones de calidad necesarias, a juicio de la Dirección Facultativa no teniendo el contratista derecho a reclamación alguna por estas condiciones exigidas.

3. Condiciones de equipos electromecánicos

3.1. Generalidades de los equipos electromecánicos

Se tenderá siempre hacia la estandarización de los equipos electromecánicos instalados en la planta, con lo que se conseguirá facilitar el repuesto de las piezas defectuosas y reducir los periodos de mantenimiento.

En cuanto al ruido generado, se deberá cumplir la Normativa de Seguridad e Higiene en el Trabajo antes mencionada.

Para los equipos que presenten un peso considerable se instalarán sistemas de izado y manejo que facilite su mantenimiento e instalación.

Por último, los equipos principales instalados en el tratamiento terciario son los siguientes:

- Bombas de impulsión de caudal de agua.
- Bombas de dosificación de reactivos.
- Válvulas de regulación del caudal.
- Agitadores de reactores y depósitos.
- Columnas de adsorción.
- Filtros de profundidad verticales con lecho de arena.
- Tanques de almacenamiento.
- Instrumentos de laboratorio para análisis de aguas y mediciones de caudal.

- Tanques reactores.

Las características de estos, las etapas en las que se han instalado y la justificación de su elección se presenta con detalle en el apartado 9 Maquinaria e instalaciones de la Memoria de este proyecto. Por otro lado, las características técnicas de los mismos se exponen en los catálogos expuestos en los anexos de la memoria. La inversión necesaria para su adquisición e instalación se muestra en los Presupuestos del proyecto.

3.2. Control de calidad externo

La Propiedad contratará los servicios de una empresa externa de control de calidad que actuará como auxiliar de la Dirección de Obra.

El adjudicatario y sus talleres subcontratados y suministradores aceptarán en todo momento, las visitas e inspecciones; entregarán los certificados y dossier que se soliciten, en el bien entendido que ningún material, ni equipo o partes de instalaciones serán recibidos en la obra sin el "Certificado de control de calidad de la Dirección de Obra".

Se contará con las siguientes líneas de actuación:

Estructuras metálicas:

- Certificados de materiales de construcción, homologación de equipos de instalación, etc.
- Controles dimensionales y estructurales.
- Controles de acabados.
- Seguimiento de las fases de pedido.
- Aceptación final.

Instalación y suministro de equipamiento diverso (bombas, válvulas, sistemas de aireación...):

- Certificados de materiales y equipos.
- Certificados de ensayos.
- Seguimientos de pedido.
- Nota de aceptación.

3.3. Control de calidad interno

El adjudicatario entregará a la propiedad al final de la obra un dossier interno con todos los certificados de control de calidad interno, el autocontrol del propio adjudicatario y el control de calidad externo.

3.4. Pruebas de funcionamiento

Desde la instalación de los equipos de tratamiento de aguas hasta la puesta en funcionamiento del tratamiento terciario se llevarán a cabo varios niveles de pruebas.

En primer lugar, se desarrollan las pruebas de acabado. La Dirección de obra realizará la oportuna comprobación de que todas las instalaciones montadas están en perfectas condiciones de acabado y pintura tal y como se especifica en el pliego de condiciones. En caso de incumplimiento, la propia Dirección elaborará un registro de incidencias a entregar al Constructor para que proceda a su reparación.

Una vez superadas las pruebas de acabado, se procede al siguiente nivel con las pruebas en vacío. La Dirección de Obra las siguientes pruebas:

- Comprobaciones de conexiones eléctricas.
- Comprobaciones de cableado.
- Comprobaciones de niveles de lubricación.
- Comprobaciones de ruidos, golpes e iluminación.
- Comprobaciones del sistema de control de los autómatas.
- Comprobaciones de elementos de control y seguridad.

En el caso de cumplimiento acertado de estas pruebas de segundo nivel, la Dirección de Obra redactará el certificado de aprobación. En caso contrario, la propia Dirección elaborará un registro de incidencias a entregar al Constructor para que proceda a su reparación.

Una vez superado el segundo nivel, se desarrollarán las pruebas en carga de los equipos e instalaciones con el objetivo principal de cerciorarse de que se cumplen con los rendimientos y estados de funcionamiento exigidos en el Pliego de Condiciones. Éstas consistirán en:

- Prueba en servicio de soplantes y sistemas de aireación.
- Pruebas de bombeos de agua, fangos y reactivos.
- Pruebas de estanqueidad.
- Comprobaciones de intensidades de todos los equipos.

En el caso de cumplimiento acertado de estas pruebas de tercer nivel, la Dirección de Obra redactará el certificado de aprobación. En caso contrario, la propia Dirección elaborará un registro de incidencias a entregar al Constructor para que proceda a su reparación.

Finalmente, una vez cumplidas las pruebas de tercer nivel, se efectúan las pruebas finales. Entonces se procede a la entrada de agua al tratamiento y a su puesta en marcha completa. En caso de registrarse un funcionamiento normal se redactará el acta de aceptación que acompañará al acta de recepción provisional de las obras. No obstante, la instalación estará sometida a pruebas periódicas durante el primer año de garantía y la Constructora se encargará de la reparación de las anomalías que se registren. Si al cabo de un año de trabajo efectivo de las instalaciones los rendimientos medios como media de los valores medios diarios (de un año) no coincidiesen o superasen los previstos en proyecto, se podrán aplicar penalizaciones.

3.5. Equipos de reserva

Todo elemento mecánico cuya avería inesperada pueda impedir el desarrollo del proceso de tratamiento, tendrá una reserva instalada o en almacén, en función de lo que aconseje la ficha técnica del elemento en cuestión.

En el presupuesto se incluirá el costo de las piezas de repuesto, que en condiciones normales de funcionamiento, deberían ser sustituidas dentro de un plazo de dos años como mínimo. Este tiempo variará en función del equipo en cuestión.

3.6. Documentación exigida de los equipos

En este apartado se expone la documentación que el Contratista debe preparar y entregar a la Administración redactados, como mínimo, en el idioma propio del país en el que se efectúa el proyecto. La documentación en cuestión es la siguiente:

a) **Placas oficiales características:**

Se exigirá que los equipos dispongan de una placa oficial en la que se presenten las características más importantes, situada siempre en un lugar visible.

b) **Planos generales:**

Se recogerán los planos tanto de obra civil, como de los equipos e instalaciones que han servido para la concepción y montaje de la planta proyectada. En cada uno de estos planos deben estar reflejadas todas las modificaciones habidas desde la redacción del Proyecto de Construcción, hasta la ejecución completa de las unidades de obra y su Recepción Provisional correspondiente. Así

mismo, deberán elaborarse y entregarse a la Administración los planos finales de liquidación, según lo construido, reflejando las modificaciones y/o mejoras introducidas durante el período de explotación en garantía.

c) **Planos de los equipos:**

Este apartado se refiere a todos aquellos planos, no incluidos en el apartado anterior, que completan la definición de cada equipo y permiten el conocimiento de este para reparar o sustituir en caso necesario, durante la fase de explotación, algunas de sus partes.

d) **Certificados de garantía:**

Quedarán definidos los certificados de garantía de obra civil así como de sus materiales, las certificaciones de control de calidad de equipos e instalaciones y los gráficos con las curvas características de las bombas, soplantes y compresores.

e) **Manuales de mantenimiento:**

Se comprenden los manuales de mantenimiento y conservación que el Contratista entregará a la Administración antes de la Recepción. Se incluirán:

- Los manuales de mantenimiento y conservación del conjunto de la planta y de cada una de sus unidades.
- Las especificaciones del material necesario para el montaje de los equipos.
- El coste de las piezas de repuesto recomendadas por el Contratista.
- Especificaciones del material necesario para la sustitución de las partes de cada equipo de la instalación.

4. Prescripciones de ejecución de las obras

La ejecución de las obras se ajustará a los planos y el pliego de condiciones que se describe en este capítulo del Proyecto, aclarando cualquier discrepancia que pudiese existir entre los Ingenieros Directores de Obra. Todos los trabajos incluidos en el presente trabajo se ejecutarán esmeradamente de acuerdo con las buenas prácticas de la construcción y cumpliendo estrictamente las instrucciones recibidas por la Dirección Facultativa. Al contratista no le servirá de pretexto la baja subasta para variar la esmerada ejecución ni la primerísima calidad de las instalaciones proyectadas en cuanto a sus materiales y mano de obra.

Si por cualquier circunstancia fuese preciso realizar alguna variación en las obras proyectadas se redactará el correspondiente proyecto reformado, el cual desde dicha fecha se considerará como parte

integrante del proyecto primitivo, y por lo tanto, sujeto a las mismas especificaciones de todos los documentos que lo componen.

En el proceso constructivo de las diferentes unidades que conforman el proyecto se aplicarán las especificaciones de la Normativa vigente, tomando como referencia las siguientes:

- Normas MV.
- Normas Tecnológicas NTE.
- EHE-08.
- Normas CTE.

4.1. Dirección de la obra

La Administración designará el equipo de ingenieros que se encargará de la gestión y control del desarrollo de las obras, cuyas órdenes deberán ser aceptadas por el contratista, para lo cual quedarán especificadas por escrito.

4.2. Ocupación y presencia del contratista

El Contratista no podrá ocupar los terrenos afectados por la Obra hasta recibir la orden por parte de la Administración gestora del proyecto. Asimismo, el propio Contratista no puede abandonar la obra sin dejar un representante capacitado para reemplazarle en todas las tareas que son de su competencia.

4.3. Condiciones generales de ejecución

4.3.1. Replanteo

Una vez adjudicada la obra al Contratista, se procederá al replanteo general del terreno. Los replanteos, trazados, nivelaciones y demás obras previstas, se efectuarán por el Contratista de acuerdo con las indicaciones del proyecto (planos, pliego, medidas...) que faciliten la ejecución de los mismos. No se admitirán errores mayores de 1/500 de las dimensiones originales, sin olvidar el conjunto de márgenes de error asociados a la ejecución de cada unidad de obra

Del resultado del replanteo se redactarán actas oficiales que deberán ser firmadas por ambas partes, dejando constancia si se puede o no proceder a la ejecución de la obra.

4.3.2. Movimiento de tierras

4.3.2.1. Desbroce

El desbroce consiste en extraer y retirar de las zonas designadas todos los árboles, tocones, plantas, maleza, broza, maderas caídas, escombros, basura o cualquier otro material indeseable a juicio de la Dirección Facultativa.

Para la realización de las operaciones de desbroce se tomarán las medidas de precaución necesarias de acuerdo con lo que sobre el particular ordene la Dirección Facultativa, de cara a evitar daños en las construcciones y/o instalaciones próximas.

Se eliminarán todos los troncos y raíces, de tal manera que los productos no susceptibles de aprovechamiento serán retirados en la forma y lugares que estipule la Dirección Facultativa. La operación de desbroce se medirá en metros cuadrados sobre el terreno. El precio comprende el coste de todas las operaciones necesarias, incluso el transporte a vertedero.

Todos los huecos causados por la extracción de tocones y raíces se rellenarán con material análogo al existente, compactándose hasta que su superficie se ajuste al nivel pedido.

4.3.2.2. Explanación y prestamos

Consiste en el conjunto de operaciones para excavar, evacuar, rellenar y nivelar el terreno así como las zonas de préstamos que puedan necesitarse y el consiguiente transporte de los productos removidos a depósito o lugar de empleo.

Una vez terminadas las operaciones de desbroce del terreno, se iniciarán las obras de excavaciones ajustándose a las alienaciones pendientes dimensiones y demás información contenida en los planos.

La tierra vegetal que se encuentre en las excavaciones y no se haya extraído durante el desbroce se aceptará para su utilización posterior. Ésta junto al resto de materiales que se obtengan de la excavación podrán ser utilizados para el relleno de huecos y otros usos fijados en el Pliego. En el caso de no ser empleados se transportarán al vertedero previsto según las especificaciones de la Dirección Facultativa. En cualquier caso, no se desechará ningún material excavado sin previa autorización.

En cuanto a la medición y abono de esta etapa de las obras, la excavación se abonará en función de los metros cúbicos extraídos. El precio comprende el coste de todas las operaciones necesarias incluyendo el transporte a vertedero o a depósitos de los productos sobrantes.

4.3.2.3. Excavación en zanjas y pozos

Consiste en el conjunto de operaciones necesarias para conseguir emplazamiento adecuado a las obras de fábrica y estructuras, y sus cimentaciones; comprenden zanjas de drenaje u otras análogas. Su ejecución incluye las operaciones de excavación, nivelación y evacuación del terreno y el consiguiente transporte de los productos removidos a depósito o lugar de empleo.

Para la preparación de zanjas se deberá seguir la norma UNE-EN 1610:2016, Construcción y ensayos de desagües y redes de alcantarillado. Durante las excavaciones se deberán tomar medidas de seguridad para evitar efectos perjudiciales como la caída de objetos a la zanja o su colapso por la ubicación inadecuada de la maquinaria.

La excavación continuará hasta llegar a la profundidad en que aparezca el firme y obtenerse una superficie limpia y firme, a nivel o escalonada, según se ordene. No obstante, la Dirección Facultativa podrá modificar la profundidad, si la vista de las condiciones del terreno lo estimara necesario a fin de conseguir una cimentación satisfactoria.

Se dará comienzo a la excavación de las zanjas cuando existan todos los elementos necesarios para ello. La contrata deberá asegurar la estanqueidad de los taludes y paredes verticales de todas las excavaciones que realice, aplicando los medios de entibación, apuntalamiento, apeo y protección superficial del terreno que considere necesario. Esto será indispensable si se quieren evitar posibles desprendimientos, derrumbamientos y deslizamientos que pudieran causar daño a los operarios.

Se adoptarán por la Contrata todas las medidas necesarias para evitar la entrada del agua, manteniendo libre de la misma la zona de excavación, colocándose ataguías, drenajes, protecciones, cunetas, canaletas y conductos de desagüe que sean necesarios.

Las aguas superficiales deberán ser desviadas por la Contrata y canalizadas antes de que alcancen los taludes, las paredes y el fondo de la excavación de la zanja. El fondo de la zanja deberá quedar libre de tierra, fragmentos de roca o cualquier elemento extraño que pudiera debilitar su resistencia.

Mientras no se efectúe la consolidación definitiva de las paredes y fondos de la zanja, se conservarán las entibaciones, apuntalamientos y apeos que hayan sido necesarios, así como las vallas, cerramientos y demás medidas de protección.

En cuanto a la preparación de las cimentaciones, la excavación de cimientos se profundizará hasta el límite indicado en el proyecto. Antes de proceder al vertido del hormigón y la colocación de las armaduras en la cimentación, se colocará una capa inferior de hormigón pobre de diez centímetros debidamente nivelada.

La excavación en zanjas o pozos se abonará en metros cúbicos. El precio comprende el coste de todas las operaciones necesarias, incluso el transporte a vertedero o a depósitos de los productos sobrantes.

4.3.2.4. Relleno y apisonado de zanjas o pozos

Consiste en la extensión o compactación de materiales terrosos, procedentes de excavaciones anteriores o préstamos para relleno de zanjas y pozos.

No se aceptan como relleno los siguientes materiales:

- Arcillas muy plásticas
- Suelos altamente orgánicos
- Materiales que puedan ser perjudiciales, física o químicamente, para las tuberías.
- Hormigón constitutivo
- Armaduras

Los materiales de relleno se extenderán en tongadas sucesivas de espesor uniforme y sensiblemente horizontales. El espesor de estas tongadas será el adecuado a los medios disponibles para que se obtenga en todo el mismo grado de compactación exigido. La superficie de las tongadas será horizontal o convexa con pendiente transversal máxima del dos por ciento.

Una vez extendida la tongada, se procederá a la humectación si es necesario. El contenido óptimo de humedad se determinará en obra, a la vista de la maquinaria disponible y de los resultados que se obtengan de los ensayos realizados.

Una vez conseguida la humectación más conveniente, posteriormente se procederá a la compactación mecánica de la tongada.

Antes de hormigonar se dejarán previstos los pasos de tuberías correspondientes, se colocarán las armaduras según los planos de estructura tanto de las zapatas como de los arranques de muros y pilares, y de los diámetros y calidad indicados en mediciones y estructuras.

Las distintas zonas de los rellenos se abonarán por metros cúbicos. El precio comprende el coste de todas las operaciones necesarias para la realización de la unidad, así como el aporte de los materiales acordes con las especificaciones, medios auxiliares, etc. para cumplir las exigencias marcadas en el proyecto.

4.3.3. Red de saneamiento

Las obras de alcantarillado, pozo y demás partidas que constituyen la red de saneamiento se harán con los materiales marcados en medición y con las dimensiones fijadas en cada caso.

El ancho de las zanjas para alojar los tubos de saneamiento será el necesario para ejecutar los trabajos de obra sin problemas para la maquinaria. Todos los materiales serán transportados y manipulados con la seguridad pertinente con el objetivo de no restarle calidad antes de su instalación.

Arquetas, pozos de registro y sumideros se medirán y abonarán por unidades, y las tuberías se abonarán por metro instalado. El precio comprende los materiales, mano de obra, medios auxiliares, excavación de tierras, rellenos, etc., necesarios para dejar completamente terminada la unidad tal y como se encuentra definida en los documentos del proyecto.

4.3.4. Instalación de tuberías

La instalación de las tuberías en el tratamiento consiste en el conjunto de trabajos que hay que realizar para la colocación de toda la red de agua, gas, aire y fangos en su posición definitiva, garantizando el cumplimiento de las funciones hidráulica y mecánica para las cuales ha sido diseñada.

La partida de tuberías instalada estará compuesta por las conducciones que figuren en los planos y mediciones, exigiéndose un mínimo de calidad y fiabilidad. El material de cada tubería será tal que ofrezca unas características mecánicas adecuadas a la función que han de desempeñar.

Los tramos de la trazada deben determinarse de tal forma que se consigan trayectos lo más rectos y cortos posibles. Tanto los cambios de dirección como la longitud de tubería influyen en la pérdida de carga por rozamientos. Se instalarán ventosas que permitan la salida de aire en los contrapendientes, y por otra parte desagües en los puntos bajos.

En cuanto a la instalación de la red de tuberías, las instrucciones que se deben seguir se encuentran en las normativas:

- EN805
- EN 1610
- ENV 1046

La tubería se dispondrá en la zanja de forma que se sitúe uniformemente sobre la cama de apoyo en toda su longitud perfectamente nivelada y sujeta al suelo. Se debe asegurar que tanto los tubos, como las juntas, deben estar limpios antes de su instalación. En los extremos del tubo y las juntas se aplicará jabón lubricante para facilitar el deslizamiento éstos durante las operaciones de montaje. Finalmente se procederá a precisar la alineación correcta de los tubos, realizando la unión de cada tubo con su precedente.

4.3.5. Estructuras

La estructura tanto de hormigón como metálica cumplirá con todas las normas en vigor, en cuanto a valoración de cargas, esfuerzos, coeficientes de seguridad, colocación de elementos estructurales y ensayos y control de esta según se especifica en el Proyecto. Cumplirán las condiciones que se exigen

en las Instrucciones EHE, EP-93 y Normas NBE-EA-95, NBE-AE- 88 y NBE-FL-90, así como las Normas Tecnológicas de la Edificación (NTE), Instrucción para la recepción de cementos RC-97 y Norma sismo- resistente NCSE-94.

No obstante, se incluyen una serie de condiciones de ejecución que habrán de verificarse en la elaboración, colocación y construcción definitiva de la misma. Se replanteará perfectamente toda la estructura de acuerdo con los planos, tanto en planta como en altura y tamaños, antes de proceder a la colocación de encofrados, apeos y demás útiles de ayuda.

Tanto la armadura del hormigón como los perfiles laminados serán del diámetro, clase y tamaño especificado en los planos de estructura. Se comprobarán todos los armados de la estructura, despiece y colocación no procediéndose a su hormigonado hasta que no se haya verificado por la Dirección Facultativa.

En las obras de hormigón armado se regarán todos los encofrados antes de hormigonar, debiéndose interrumpir este en caso de temperaturas inferiores a 5º. Durante los 7 primeros días como mínimo será obligatorio el regado diario y no se desencofrará antes de los 7 días en caso de pilares y muros, y de 15 días en caso de vigas, losas y forjados reticulados, no permitiéndose hasta entonces la puesta en carga de ninguno de los elementos de esta estructura.

Los forjados se medirán y abonarán por metros cuadrados ejecutados, el precio comprende además los medios auxiliares, mano de obra y materiales, así como las cimbras, encofrados, etc., necesarios.

Los aceros laminados y obras metálicas se medirán y abonarán por su peso en kilogramos. El peso se deducirá de los pesos unitarios que dan los catálogos de perfiles y de las dimensiones correspondientes medidas en los planos de Proyecto. No será de abono el exceso de obra que por su conveniencia, errores u otras causas, ejecuta el Constructor. El precio comprende además los medios auxiliares, mano de obra y materiales necesarios.

4.3.6. Instalación eléctrica

La ejecución de las instalaciones se ajustará a lo especificado en los reglamentos vigentes y a las disposiciones complementarias que puedan haber dictado la Delegación de Industrial en el ámbito de su competencia. Así mismo, en el ámbito de las instalaciones que sea necesario, se seguirán las normas de la Compañía Suministradora de Energía. Toda la instalación cumplirá el Reglamento de Baja Tensión, y los distintos conductores tendrán las secciones mínimas que en él se prescriben.

a) Canalizaciones eléctricas

Los cables se colocarán dentro de tubos o canales, fijados directamente sobre las paredes, enterrados, directamente empotrados en estructuras, en el interior de huecos de la construcción, bajo molduras, en bandeja o soporte de bandeja, según se indica en Memoria, Planos y Mediciones.

Las canalizaciones se instalarán separadas 30cm como mínimo de la de agua y 5cm como mínimo de las de teléfono o antenas. En cualquier caso todos los materiales de la instalación se protegerán durante el transporte, uso y colocación de estos.

Antes de iniciar el tendido de la red de distribución, deberán estar ejecutados los elementos estructurales que hayan de soportarla o en los que vaya a ser empotrada: forjados, tabiquería, etc. Salvo cuando al estar previstas se hayan dejado preparadas las necesarias canalizaciones al ejecutar la obra previa, deberá replantearse sobre ésta en forma visible la situación de las cajas de mecanismos, de registro y protección, así como el recorrido de las líneas, señalando de forma conveniente la naturaleza de cada elemento.

Todos los materiales de la instalación se protegerán durante el transporte, uso y colocación de estos. La instalación de toma de tierra será de uso exclusivo para la puesta a tierra de toda la instalación eléctrica. La tensión de contacto será inferior a 24 V. en cualquier masa, y con una resistencia del terreno menos de 20 Ohmios. Se cuidará en todo momento que los trazados guarden las:

- Maderamen, redes y nonas en número suficiente de modo que garanticen la seguridad de los operarios y transeúntes.
- Maquinaria, andamios, herramientas y todo el material auxiliar para llevar a cabo los trabajos de este tipo.

b) Conductores

Los conductores eléctricos, serán de cobre electrolítico, aislados adecuadamente, siendo su tensión nominal de 0,6/1 kilovoltios para la línea repartidora y de 750 Voltios para el resto de la instalación, debiendo estar homologados según normas UNE citadas en la Instrucción MI-BT- 044.

Los conductores de protección serán de cobre y presentarán el mismo aislamiento que los conductores activos. Se podrán instalar por las mismas canalizaciones que éstos o bien en forma independiente, siguiéndose a este respecto lo que señalen las normas particulares de la empresa distribuidora de la energía. La sección mínima de estos conductores será la obtenido utilizando la tabla 2 (Instrucción ITC-BTC-19, apartado 2.3), en función de la sección de los conductores de la instalación.

Las canalizaciones eléctricas se establecerán de forma que por conveniente identificación de sus circuitos y elementos, se pueda proceder en todo momento a reparaciones, transformaciones, etc. De manera que los conductores deberán poder ser identificados por el color de su aislamiento, de la siguiente manera:

- Azul claro para el conductor neutro.
- Amarillo - verde para el conductor de tierra y protección.
- Marrón, negro y gris para los conductores activos o fases.

Las conexiones entre conductores se realizarán en el interior de cajas apropiadas de material plástico resistente incombustible o metálicas, en cuyo caso estarán aisladas interiormente y protegidas contra la oxidación. Las dimensiones de estas cajas serán tales que permitan alojar holgadamente todos los conductores que deban contener. Su profundidad será igual, por lo menos, a una vez y media el diámetro del tubo mayor, con un mínimo de 40 mm; el lado o diámetro de la caja será de al menos 80 mm. Cuando se quieran hacer estancas las entradas de los tubos en las cajas de conexión, deberán emplearse prensaestopas adecuados. En ningún caso se permitirá la unión de conductores, como empalmes o derivaciones por simple retorcimiento o arrollamiento entre sí de los conductores, sino que deberá realizarse siempre utilizando bornes de conexión.

Los conductos se fijarán firmemente a todas las cajas de salida, de empalme y de paso, mediante contratueras y casquillos. Se tendrá cuidado de que quede al descubierto el número total de hilos de rosca al objeto de que el casquillo pueda ser perfectamente apretado contra el extremo del conducto, después delo cual se apretará la contratuerca para poner firmemente el casquillo en contacto eléctrico con la caja.

Los conductos y cajas se sujetarán por medio de pernos de fiador en ladrillo hueco, por medio de pernos de expansión en hormigón y ladrillo macizo y clavos Split sobre metal. Los pernos de fiador de tipo tornillo se usarán en instalaciones permanentes, los de tipo de tuerca cuando se precise desmontarla instalación, y los pernos de expansión serán de apertura efectiva. Serán de construcción sólidas y capaces de resistir una tracción mínima de 20 kg. No se hará uso de clavos por medio de sujeción de cajas o conductos.

Finalmente, antes de la puesta en servicio del sistema eléctrico, se realizarán los ensayos adecuados para probar a la entera satisfacción de la Dirección de Obra que todo el equipo, aparatos y cableado han sido correctamente instalados de acuerdo con los planos y especificaciones y están en condiciones satisfactorias de operación.

En general, además de los ensayos eléctricos propiamente dichos se realizará una inspección visual de los equipos comprobando vibraciones, calentamientos excesivos, defectos mecánicos de los materiales, etc.

La inspección realizada en el equipo estará de acuerdo con las prácticas de Ingeniería aceptadas, Reglamentos Electrónicos de Alta y Baja Tensión, y más específicamente con esta especificación y las instrucciones del fabricante.

4.3.7. Pinturas

Salvo indicación específica en contra por la Dirección Facultativa, no serán pintadas las siguientes superficies:

- Aceros inoxidables y galvanizados, aluminio, titanio, monel y aleaciones de cobre.
- Las partes mecanizadas de los equipos instalados.
- Los materiales de aislamiento.
- Placas características de los equipos.
- Componentes de los equipos como tornillos, muelles, tuercas...

En cuanto al procedimiento de pintura que se debe seguir será el conforme a la norma DIN 2403.

La superficie que se va a pintar deberá estar seca, desengrasada, sin óxido ni polvo, para lo cual se empleará cepillos, sopletes de arena, ácidos y alices cuando sean metales.

Los poros, grietas, desconchados, etc., se llenarán con másticos o empastes para dejar las superficies lisas y uniformes. Se utiliza un pigmento mineral, aceite de linaza o barniz y un cuerpo de relleno para las maderas.

Los másticos y empastes se emplearán con espátula en forma de masilla, una vez secos, se pasarán con papel de lija en pares y se alisarán con piedra pómez, agua y fieltro, sobre metales.

Las pinturas se podrán dar con pinceles y brocha, con aerógrafo, con pistola, (pulverizando con aire comprimido) o con rodillos. Dichas brochas y pinceles serán de pelo de diversos animales, siendo los más corrientes el de cerdo o jabalí y se clasificarán por números o por gramos de pelo que contienen. También pueden ser de nylon.

Los aerógrafos o pistolas constan de un recipiente que contiene la pintura con aire a presión (1-6 atmósferas), el compresor y el pulverizador, con orificio que varía desde 0,2 mm hasta 7 mm, formándose un cono de 2 cm. al metro de diámetro.

Dependiendo del tipo de soporte se realizarán una serie de trabajos previos, con objeto de que al realizar la aplicación de la pintura o revestimiento, consigamos una terminación de gran calidad. Estos son:

- **Yesos y cementos así como sus derivados:**

Se realizará un lijado de las pequeñas adherencias e imperfecciones. A continuación se aplicará una mano de fondo impregnado los poros de la superficie del soporte. Posteriormente se realizará un plastecido de faltas, repasando las mismas con una mano de fondo. Se aplicará seguidamente el acabado final con un rendimiento no menor del especificado por el fabricante.

- **Madera:**

Se procederá a una limpieza general del soporte seguida de un lijado fino de la madera. A continuación se dará una mano de fondo con barniz diluido mezclado con productos de conservación de la madera si se requiere, aplicado de forma que queden impregnados los poros.

Pasado el tiempo de secado de la mano de fondo, se realizará un lijado fino del soporte, aplicándose a continuación el barniz, con un tiempo de secado entre ambas manos y un rendimiento no menor de los especificados por el fabricante.

- **Metales:**

Se realizará un raspado de óxidos mediante cepillo, seguido inmediatamente de una limpieza manual esmerada de la superficie. A continuación se aplicará una mano de imprimación anticorrosiva, con un rendimiento no inferior al especificado por el fabricante. Pasado el tiempo de secado se aplicarán dos manos de acabado de esmalte, con un rendimiento no menor al especificado por el fabricante.

Para superficies ya pintadas, si la superficie está en buenas condiciones, se limpiará de todas las sustancias extrañas. Si hay pintura pelada, se limpiará la superficie convenientemente y se tratará como si fuese nueva.

Por último, la pintura se medirá y abonará en general, por metro cuadrado de superficie pintada. En los precios respectivos esta incluidos el coste de todos los materiales y operaciones necesarias para obtener la perfecta terminación de las obras, incluso la preparación, lijado, limpieza, plastecido, etc. y todos cuantos medios auxiliares sean precisos.

4.4. Precauciones que adoptar

Las precauciones que adoptar durante la construcción de la obra serán las previstas por la Ordenanza de Seguridad e Higiene en el trabajo aprobada por O.M. de 9 de marzo de 1971 y R.D. 1627/97 de 24 de octubre.

Estado de medicaciones

ÍNDICE DEL ESTADO DE MEDICIONES:

1. Estado de mediciones	357
1.1. Partida 1: Obra civil.....	357
1.2. Partida 2: Instalaciones	358
1.3. Partida 3: Tanques y reactores.....	359
1.4. Conducciones y accesorios	360
1.5. Partida 5: Equipos electromecánicos e instrumentación	361
1.6. Partida 6: Instalación eléctrica.....	362

1. Estado de mediciones

En este documento se enumeran los diferentes elementos necesarios para la construcción y puesta a punto de la planta.

1.1. Partida 1: Obra civil

La primera partida tiene relación con las obras civiles a realizar. Como se puede apreciar, tan solo se proyecta la obra de dos depósitos, pues el resto de los servicios ya se encuentra disponible en la nave industrial principal ubicada en el mismo solar. Tampoco es necesaria la pavimentación del suelo dado que este ya se encuentra preparado para la instalación.

Tabla 57: Cantidad de elementos en la partida 1 del estado de mediciones.

Elemento	Unidad	Cantidad
<i>Balsa pulmón hormigón armado (144 m³)</i>	<i>u</i>	<i>1</i>
<i>Tanque final hormigón armado (144 m³)</i>	<i>u</i>	<i>1</i>

1.2. Partida 2: Instalaciones

En esta partida se consideran las instalaciones imprescindibles para la puesta en marcha del tratamiento. Cabe señalar que no se tienen en cuenta las columnas de adsorción puesto que estas figuran en costes, no en presupuestos. Tampoco se tiene en cuenta los depósitos y reactores puesto que figuran en otra partida.

Tabla 58 Cantidad de elementos en la partida 2 del estado de mediciones

Elemento	Unidad	Cantidad
<i>Filtros PVC de arena (685 kg relleno)</i>	<i>u</i>	2
<i>Accesorios columnas y filtros</i>	<i>u</i>	1

1.3. Partida 3: Tanques y reactores

En esta tercera partida, se tienen en cuenta los tanques y reactores necesarios en la planta.

Tabla 59: Cantidad de elementos en la partida 3 del estado de mediciones.

Elemento	Unidad	Cantidad
<i>Reactor cilíndrico abierto de elevación de pH INOX AISI 316 (2, 29 m³)</i>	<i>u</i>	<i>1</i>
<i>Tanque cilíndrico cerrado agitado de Na(OH) INOX AISI 316 (2, 702 m³)</i>	<i>u</i>	<i>1</i>
<i>Reactor cúbico abierto de disminución de pH INOX AISI 316 (2, 35 m³)</i>	<i>u</i>	<i>1</i>
<i>Tanque cilíndrico cerrado agitado de HCl INOX AISI 316 (2, 702 m³)</i>	<i>u</i>	<i>1</i>
<i>Reactor cúbico abierto de cloración INOX AISI 316 (2, 35 m³)</i>	<i>u</i>	<i>1</i>
<i>Tanque cilíndrico cerrado agitado de NaClO INOX AISI 316 (2, 702 m³)</i>	<i>u</i>	<i>1</i>

1.4. Conducciones y accesorios

La cuarta partida contiene todos los costes relacionados con la red de agua residual a depurar, teniendo en cuenta tanto tramos rectos, como accidentes.

Tabla 60: Cantidad de elementos en la partida 4 del estado de mediciones.

Elemento	Unidad	Cantidad
<i>Tubo acero DN 0,5"</i>	<i>m</i>	14,202
<i>Codo 90° latón H-H DN 0,5"</i>	<i>u</i>	6
<i>Válvula de asiento latón DN 0,5"</i>	<i>u</i>	9
<i>Tubo acero DN 1,5"</i>	<i>m</i>	35,4
<i>Codo 90° latón H-H DN 1,5"</i>	<i>u</i>	10
<i>Trifurcación latón DN 1,5"</i>	<i>u</i>	2
<i>Válvula de asiento latón DN 1,5"</i>	<i>u</i>	6
<i>Tubo acero DN 2"</i>	<i>m</i>	240,17
<i>Codo 90° latón H-H DN 2"</i>	<i>u</i>	40
<i>T latón H-H-H DN 2"</i>	<i>u</i>	4
<i>Válvula de asiento latón DN 2"</i>	<i>u</i>	34

1.5. Partida 5: Equipos electromecánicos e instrumentación

Esta quinta partida hace referencia a los gastos en equipos electromecánicos e instrumentación.

Tabla 61: Cantidad de elementos en la partida 5 del estado de mediciones.

Elemento	Unidad	Cantidad
<i>Bomba dosificadora Memdos DX 4 de Lutz Jesco</i>	<i>u</i>	<i>3 + 1R</i>
<i>Mezclador VHD3-06 B 04 de FluidMix</i>	<i>u</i>	<i>3 + 1R</i>
<i>Mezclador VPS3 de FluidMix</i>	<i>u</i>	<i>2 + 1R</i>
<i>Bomba Prisma 15 2 de Espa</i>	<i>u</i>	<i>2 + 1R</i>
<i>Bomba Drain 100 de Espa</i>	<i>u</i>	<i>1 + 1R</i>
<i>Bomba Prisma 15 1 de Espa</i>	<i>u</i>	<i>1 + 1R</i>
<i>Bomba Tecno 5 3 de Espa</i>	<i>u</i>	<i>1 + 1R</i>
<i>Sistema de cloración automático</i>	<i>u</i>	<i>1</i>
<i>Sistema de acidificación automático</i>	<i>u</i>	<i>2</i>
<i>Caudalímetro</i>	<i>u</i>	<i>6</i>
<i>Manómetro diferencial</i>	<i>u</i>	<i>7</i>
<i>Equipo laboratorio análisis del boro</i>	<i>u</i>	<i>1</i>

1.6. Partida 6: Instalación eléctrica

La última partida es destinada a la instalación eléctrica del tratamiento. Se tienen en cuenta los gastos en los elementos de iluminación, la instalación eléctrica industrial necesaria en relación a los equipos electromecánicos e instrumentación presupuestados y, finalmente, la línea de distribución de la planta.

Tabla 62: Cantidad de elementos en la partida 6 del estado de mediciones

Elemento	Unidad	Cantidad
<i>Luminaria exterior de chapa sobre báculo 5 m</i>	u	2
<i>Instalación eléctrica industrial</i>	kW	30
<i>Línea de distribución de baja tensión</i>	m	40

Presupuesto

ÍNDICE DEL PRESUPUESTO:

1. Presupuesto de inversión	367
1.1. Presupuesto de Ejecución Material (PEM).....	367
1.1.1. Partida 1: Obra civil	367
1.1.2. Partida 2: Instalaciones	368
1.1.3. Partida 3: Tanques y reactores	369
1.1.4. Partida 4: Conducciones y accesorios.....	370
1.1.5. Partida 5: Equipos electromecánicos e instrumentación.....	371
1.1.6. Partida 6: Instalación eléctrica	372
1.2. Presupuesto de Ejecución por Contrata (PEC)	374

1. Presupuesto de inversión

En este documento se determinan las partidas económicas y los elementos que componen cada una de ellas, así como su precio. Mediante el cálculo de los precios totales se establecen los presupuestos de ejecución de material parcial en cada partida y, seguidamente, el presupuesto de ejecución de material (PEM) con la suma de estos.

Después del cálculo anterior, se determina el presupuesto de ejecución por contrata (PEC) y, finalmente el presupuesto de inversión.

1.1. Presupuesto de Ejecución Material (PEM)

El PEM es el resultado de la suma de los PEM parciales de cada partida. En este caso, la suma de las 6 partidas que se describen a lo largo de los siguientes subapartados.

$$PEM = P_O + P_I + P_T + P_C + P_{Eq} + P_E$$

1.1.1. Partida 1: Obra civil

La primera partida tiene relación con las obras civiles a realizar. Como se puede apreciar, tan solo se proyecta la obra de dos depósitos, pues el resto de los servicios ya se encuentra disponible en la nave industrial principal ubicada en el mismo solar. Tampoco es necesaria la pavimentación del suelo dado que este ya se encuentra preparado para la instalación.

Tabla 63: Presupuesto de Ejecución Material parcial de la partida 1 (P_O).

Elemento	Unidad	Cantidad	Precio unitario	Precio total
<i>Balsa pulmón hormigón armado (144 m³)</i>	<i>u</i>	1	16.500,00 €/u	16.500,00 €
<i>Tanque final hormigón armado (144 m³)</i>	<i>u</i>	1	16.500,00 €/u	16.500,00 €
PEM parcial obra civil (P_O)				33.000,00 €

Así pues, la primera partida en obra civil (P_O) asciende a un total de 33.000,00 €.

1.1.2. Partida 2: Instalaciones

En esta partida se consideran las instalaciones imprescindibles para la puesta en marcha del tratamiento. Cabe señalar que no se tienen en cuenta las columnas de adsorción puesto que estas figuran en costes, no en presupuestos. Tampoco se tiene en cuenta los depósitos y reactores puesto que figuran en otra partida.

Tabla 64: Presupuesto de Ejecución Material parcial de la partida 2 (P_1).

Elemento	Unidad	Cantidad	Precio unitario	Precio total
<i>Filtros PVC de arena (685 kg relleno)</i>	<i>u</i>	2	7.500,00 €/u	15.000,00 €
<i>Accesorios columnas y filtros</i>	<i>u</i>	1	1000,00 €/u	3000,00 €
PEM parcial instalaciones (P_1)				18.000,00 €

El presupuesto relativo a esta segunda partida en instalaciones (P_1) es de 18.000,00 €.

1.1.3. Partida 3: Tanques y reactores

En esta tercera partida, se tienen en cuenta los tanques y reactores necesarios en la planta.

Tabla 65: Presupuesto de Ejecución Material parcial de la partida 3 (P_T).

Elemento	Unidad	Cantidad	Precio unitario	Precio total
<i>Reactor cilíndrico abierto de elevación de pH INOX AISI 316 (2,29 m³)</i>	u	1	650,00 €/u	650,00 €
<i>Tanque cilíndrico cerrado agitado de Na(OH) INOX AISI 316 (2,702 m³)</i>	u	1	1.100,00 €/u	1.100,00 €
<i>Reactor cúbico abierto de disminución de pH INOX AISI 316 (2,35 m³)</i>	u	1	700,00 €/u	700,00 €
<i>Tanque cilíndrico cerrado agitado de HCl INOX AISI 316 (2,702 m³)</i>	u	1	1.100,00 €/u	1.100,00 €
<i>Reactor cúbico abierto de cloración INOX AISI 316 (2,35 m³)</i>	u	1	700,00 €/u	700,00 €
<i>Tanque cilíndrico cerrado agitado de NaClO INOX AISI 316 (2,702 m³)</i>	u	1	1.100,00 €/u	1.100,00 €
PEM parcial tanques y reactores (P_T)				5.350,00 €

Por lo tanto, esta tercera partida destinada a tanques y reactores (P_T) es de 5.350,00 €.

1.1.4. Partida 4: Conducciones y accesorios

La cuarta partida contiene todos los costes relacionados con la red de agua residual a depurar, teniendo en cuenta tanto tramos rectos, como accidentes.

Tabla 66: Presupuesto de Ejecución Material parcial de la partida 4 (P_C).

Elemento	Unidad	Cantidad	Precio unitario	Precio total
<i>Tubo acero DN 0,5"</i>	<i>m</i>	14,202	9,30 €/m	132,08 €
<i>Codo 90° latón H-H DN 0,5"</i>	<i>u</i>	6	2,95 €/u	17,70 €
<i>Válvula de asiento latón DN 0,5"</i>	<i>u</i>	9	12,15 €/u	109,35 €
<i>Tubo acero DN 1,5"</i>	<i>m</i>	35,4	14,28 €/m	505,51 €
<i>Codo 90° latón H-H DN 1,5"</i>	<i>u</i>	10	12,42 €/u	124,20 €
<i>Trifurcación latón DN 1,5"</i>	<i>u</i>	2	69,00 €/u	138,00 €
<i>Válvula de asiento latón DN 1,5"</i>	<i>u</i>	6	31,73 €/u	190,38 €
<i>Tubo acero DN 2"</i>	<i>m</i>	240,17	17,57 €/m	4.219,79 €
<i>Codo 90° latón H-H DN 2"</i>	<i>u</i>	40	16,14 €/u	645,60 €
<i>T latón H-H-H DN 2"</i>	<i>u</i>	4	40,42 €/u	161,68 €
<i>Válvula de asiento latón DN 2"</i>	<i>u</i>	34	58,63 €/u	1.993,42 €
PEM parcial conducciones y accesorios (P_C)				8.237,71 €

Por ende, esta cuarta partida relativa a conducciones y accesorios (P_C) alcanza un valor de 8.237,71 €.

1.1.5. Partida 5: Equipos electromecánicos e instrumentación

Esta quinta partida hace referencia a los gastos en equipos electromecánicos e instrumentación.

Tabla 67: Presupuesto de Ejecución Material parcial de la partida 5 (P_{Eq}).

Elemento	Unidad	Cantidad	Precio unitario	Precio total
<i>Bomba dosificadora Memdos DX 4 de Lutz Jesco</i>	<i>u</i>	3 + 1R	690,00 €/u	2.760,00 €
<i>Mezclador VHD3-06 B 04 de FluidMix</i>	<i>u</i>	3 + 1R	800,00 €/u	3.200,00 €
<i>Mezclador VPS3 de FluidMix</i>	<i>u</i>	2 + 1R	1.500,00 €/u	4.500,00 €
<i>Bomba Prisma 15 2 de Espa</i>	<i>u</i>	2 + 1R	303,00 €/u	909,00 €
<i>Bomba Drain 100 de Espa</i>	<i>u</i>	1 + 1R	533,00 €/u	1.599,00 €
<i>Bomba Prisma 15 1 de Espa</i>	<i>u</i>	1 + 1R	279,00 €/u	558,00 €
<i>Bomba Tecno 5 3 de Espa</i>	<i>u</i>	1 + 1R	354,00 €/u	708,00 €
<i>Sistema de cloración automático</i>	<i>u</i>	1	2.296,00 €/u	2.296,00 €
<i>Sistema de acidificación automático</i>	<i>u</i>	2	1.968,00 €/u	3.936,00 €
<i>Caudalímetro</i>	<i>u</i>	6	543,00 €/u	3.258,00 €
<i>Manómetro diferencial</i>	<i>u</i>	7	33,00 €/u	231,00 €
<i>Equipo laboratorio análisis del boro</i>	<i>u</i>	1	800,00 €/u	800,00 €
PEM parcial equipos electromecánicos e instrumentación (P_{Eq})				24.755,00 €

Así pues, esta quinta partida para equipos electromecánicos e instrumentación (P_{Eq}) asciende a 24.755,00 €.

1.1.6. Partida 6: Instalación eléctrica

La última partida es destinada a la instalación eléctrica del tratamiento. Se tienen en cuenta los gastos en los elementos de iluminación, la instalación eléctrica industrial necesaria en relación con los equipos electromecánicos e instrumentación presupuestados y, finalmente, la línea de distribución de la planta.

Tabla 68: Presupuesto de Ejecución Material parcial de la partida 6 (P_E).

Elemento	Unidad	Cantidad	Precio unitario	Precio total
<i>Luminaria exterior de chapa sobre báculo 5 m</i>	u	2	670,00 €	1340,00 €
<i>Instalación eléctrica industrial</i>	<i>kW</i>	30	250,00 €/kW	7500,00 €
<i>Línea de distribución de baja tensión</i>	<i>m</i>	40	50 €/m	2000,00 €
PEM parcial instalación eléctrica (P_E)				10.840,00 €

Por consiguiente, la sexta y última partida con objeto de presupuestar la instalación eléctrica tiene un valor total de 10.840,00 €,

Así pues, el presupuesto de ejecución material asciende a 100.182,71 €, tal y como se describe en la siguiente Tabla 69:

Tabla 69: Presupuesto de ejecución material (PEM).

Elemento	Precio total
<i>PEM parcial obra civil (P_O)</i>	33.000,00 €
<i>PEM parcial instalaciones (P_I)</i>	18.000,00 €
<i>PEM parcial tanques y reactores (P_T)</i>	5.350,00 €
<i>PEM parcial conducciones y accesorios (P_C)</i>	8.237,71 €
<i>PEM parcial equipos electromecánicos e instrumentación (P_{Eq})</i>	24.755,00 €
<i>PEM parcial instalación eléctrica (P_E)</i>	10.840,00 €
<i>Presupuesto de ejecución material (PEM)</i>	100.182,71 €

1.2. Presupuesto de Ejecución por Contrata (PEC)

El presupuesto de ejecución por contrata parcial se obtiene añadiendo al PEM un 13% del mismo con concepto de gastos generales y, un 6% relativo al beneficio industrial.

Finalmente para obtener el *PEC* se debe sumar el *IVA* al resultado anterior.

Tabla 70: Presupuesto de Ejecución por Contrata (PEC).

Elemento	Precio total
<i>Presupuesto de ejecución material (PEM)</i>	100.182,71 €
<i>Gastos generales (13% del PEM)</i>	13.023,75 €
<i>Beneficio industrial (6% del PEM)</i>	6.010,96 €
<i>Presupuesto de ejecución por contrata parcial</i>	119.217,42 €
<i>IVA (21% del PEC parcial)</i>	25.035,66 €
<i>Presupuesto de ejecución por contrata (PEC)</i>	144.253,08 €

En conclusión, el presupuesto de inversión total del proyecto “Diseño de un tratamiento terciario especializado en la eliminación de boro de aguas residuales de procedencia industrial cerámica” es de CIENTO CUARENTA Y CUATRO MIL DOSCIENTOS CINCUENTA Y TRES EUROS CON OCHO CÉNTIMOS.