

Trabajo Fin de Grado
Grado en Ingeniería Química

Planta de acondicionamiento de agua para
fabricación de cerveza artesanal.

Autor: Jorge Juan Flórez Benito

Tutores: Luis Francisco Vilches Arenas

Mónica Rodríguez Galán

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

Sevilla, 2020



Proyecto Fin de Grado
Grado en Ingeniería Química

Planta de acondicionamiento de agua para fabricación de cerveza artesanal.

Autor:

Jorge Juan Flórez Benito

Tutores:

Luis Francisco Vilches Arenas

Profesor Titular de Universidad

Mónica Rodríguez Galán

Profesora Contratada Doctora

Dpto. de Ingeniería Química y Ambiental

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2020

Proyecto Fin de Grado: Planta de acondicionamiento de agua para fabricación de cerveza artesanal.

Autor: Jorge Juan Flórez Benito

Tutor: Luis Francisco Vilches Arenas
Mónica Rodríguez Galán

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

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2020

El Secretario del Tribunal

*A María Jesús Benito García
y Francisco Javier Sánchez
Cortés por haberme mostrado
el camino cuando más lo
necesitaba, por estar conmigo
siempre, incluso en aquellos
momentos y lugares donde
nadie más podía hacerlo, y por
haber marcado mi vida de
forma tan extraordinaria. ¡Os
quiero!*

AGRADECIMIENTOS

A mi madre y a mis abuelos, por darme la vida, por convertirme en la persona que soy a día de hoy, por el infinito amor que me regalan cada día, por confiar y creer en mi desde que comencé mi camino para ser ingeniero químico, por dejarse la vida para poder ayudarme ofreciéndome todo lo que estaba en su mano, aunque ello haya supuesto anteponer mi bienestar al suyo, por ser mi luz en los peores momentos, por ser mis referentes y por ser las personas más maravillosas que existen.

A mi tía y a mis tíos, por toda la ayuda prestada en este camino, en el que han dedicado muchas horas de sus vidas para estar a mi lado siempre que lo he necesitado, por ser un ejemplo para mí y por quererme como lo hacen.

A mi hermana, por cuidar de nosotros y de muchas otras personas en la reciente pandemia que ha azotado nuestras vidas, demostrando ser una excelente enfermera y una grandísima persona.

A mis tutores, por la ayuda académica y el trato humano que me han brindado durante mi formación como ingeniero químico y la realización de este proyecto.

A mis amigos, por compartir las alegrías y las penas que ha deparado esta experiencia y por formar parte de mi vida.

Jorge Juan Flórez Benito

Sevilla, 2020

ÍNDICE

Agradecimientos	9
Índice	11
Índice de Tablas	13
Índice de Figuras	14
1 Introducción	16
1.1. Proceso de elaboración de cerveza artesana	16
1.2. Cervecerías artesanales	21
2 Estado del arte	23
2.1. Tipos de agua	23
2.2. Parámetros a controlar	25
2.3. Tratamiento del agua en la fabricación de cerveza	27
3 Objetivos	29
4 Descripción del proceso	31
4.1. Descripción del funcionamiento de la planta	31
4.2. Características del agua a tratar	32
4.3. Descalcificación	35
4.4. Cloración	35
4.5. Filtración	36
4.6. Adición de compuestos químicos	37
4.7. Medida de parámetros previa a la ósmosis inversa	37
4.8. Ósmosis inversa	38
4.9. Remineralización	38
5 Cálculo de equipos	40
5.1. Descalcificación	40
5.2. Cloración	40
5.3. Filtración	42
5.4. Adición de compuestos químicos	42
5.5. Ósmosis inversa	42
5.6. Remineralización	43
6 Descripción del sistema de control	49
6.1. Descalcificación	49
6.2. Cloración	49
6.3. Filtración	50
6.4. Sistemas de control previos a la unidad de ósmosis inversa	50
6.5. Ósmosis inversa	50
6.6. Remineralización	51
7 Especificaciones técnicas	52
7.1. Bomba de agua de pozo	52
7.2. Descalcificación	53
7.3. Cloración	55
7.4. Filtración	59
7.5. Adición de compuestos químicos	60
7.6. Ósmosis inversa	61
7.7. Remineralización	66
7.8. Instrumentación	69

8 Estimación económica	70
8.1. Costes de inversión	70
8.2. Costes de reposición	70
8.3. Costes de explotación	71
8.4. Coste €/l	72
9 Conclusiones	74
10 Bibliografía	75

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Producción anual de las cerveceras artesanas españolas más importantes	22
Tabla 2: Aguas de referencia	24
Tabla 3: Agua de pozo	33
Tabla 4: Agua de red	34
Tabla 5: Datos de dureza del agua	40
Tabla 6: Perfil del agua de Pilsen	43
Tabla 7: Perfil del agua de Dortmund	44
Tabla 8: Especificaciones técnicas bomba B-1	52
Tabla 9: Especificaciones técnicas descalcificador	53
Tabla 10: Especificaciones técnicas medidor de dureza	54
Tabla 11: Especificaciones técnicas medidor de caudal	55
Tabla 12: Especificaciones técnicas bomba dosificadora de hipoclorito sódico	56
Tabla 13: Especificaciones técnicas depósito de hipoclorito sódico	57
Tabla 14: Especificaciones técnicas mezclador estático	58
Tabla 15: Especificaciones técnicas filtro de arena y carbón activo	59
Tabla 16: Especificaciones técnicas depósitos de antiincrustante y ácido sulfúrico	60
Tabla 17: Especificaciones técnicas medidor de turbidez	61
Tabla 18: Especificaciones técnicas filtros de cartucho	62
Tabla 19: Especificaciones técnicas vasos de presión	63
Tabla 20: Especificaciones técnicas depósito de agua de lavado	64
Tabla 21: Especificaciones técnicas bomba centrífuga horizontal	65
Tabla 22: Especificaciones técnicas tanque agitador	66
Tabla 23: Especificaciones técnicas tolva dosificadora T-1	67
Tabla 24: Especificaciones técnicas tolva dosificadora T-2	68
Tabla 25: Especificaciones técnicas tolvas dosificadoras T-3, T-4, T-5 y T-6	68
Tabla 26: Instrumentación de la planta	69
Tabla 27: Costes de equipos	71
Tabla 28: Costes de instalación	71
Tabla 29: Costes de explotación	72

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1: Malta molida	17
Figura 1.2: Macerado de la malta	18
Figura 1.3: Lauter para separación del mosto	18
Figura 1.4: Flores de lúpulo	19
Figura 1.5: Fermentador de cerveza	20
Figura 1.6: Embotellado de cerveza	21
Figura 2.1: Relación alcalinidad residual-color de la cerveza	26
Figura 4.1: Diagrama general de la planta	31
Figura 4.2: P&ID de la planta	39
Figura 5.1: Medidor de cloro libre	41
Figura 5.2: Ajuste agua Pilsen	45
Figura 5.3: Ajuste agua Dortmund	46
Figura 5.4: Informe de nivel de iones	47
Figura 7.1: Bomba B-1	53
Figura 7.2: Descalcificador dúplex	54
Figura 7.3: Medidor de dureza de agua	55
Figura 7.4: Medidor de caudal de agua	56
Figura 7.5: Bomba dosificadora de hipoclorito sódico	56
Figura 7.6: Depósito de hipoclorito sódico	57
Figura 7.7: Mezclador estático	58
Figura 7.8: Filtro a presión de arena y carbón activo	59
Figura 7.9: Depósito de antiincrustante/ácido sulfúrico:	60
Figura 7.10: Medidor de turbidez	61
Figura 7.11: Filtro de cartucho	62
Figura 7.12: Vaso de presión	63
Figura 7.13: Depósito de agua para lavado	64
Figura 7.14: Bomba centrífuga horizontal	65
Figura 7.15: Tanque agitador	66
Figura 7.16: Tolva dosificadora T-1	67
Figura 7.17: Tolvas dosificadoras (T-2 a T-6)	69
Figura 8.1: FRC en función del interés y los años de amortización	73

1 INTRODUCCIÓN

El agua es un elemento fundamental en la fabricación de la cerveza, llegando a constituir entre el 85 y el 90 % de esta bebida. Tal es su importancia que antiguamente, cuando no existían las redes de suministro de agua, las cerveceras construían sus fábricas cercanas a manantiales de agua, debido a la gran cantidad de agua necesaria, además de la necesidad de que el agua presentase unas características determinadas y lo más constantes posibles, de esta forma, la cerveza presentaría un sabor lo más homogéneo posible. En ocasiones, al intentar reproducir una instalación de producción de cerveza en otro lugar diferente al original, al utilizar un agua distinta, la cerveza pierde su sabor original.

Muchos cerveceros centran sus esfuerzos en conseguir las mejores materias primas para elaborar sus cervezas y que sean de gran calidad. Seleccionan las mejores maltas y lúpulos, lo que conlleva un mayor coste, para aportar a las cervezas las características que se quieren resaltar. Sin embargo, puede que estos esfuerzos sean en vano porque en el agua hay gran cantidad de sales disueltas y estas sales van a potenciar algunas características más que otras. Unas marcan más los lúpulos y otras hacen que se acentúe el sabor de las maltas. Por tanto, sería conveniente realizar previamente un estudio del agua que se va a emplear, para evitar que las sales distribuyan a su antojo los sabores de los ingredientes utilizados y apaguen los tonos de las maltas que el cervecero quiere acentuar o resalten los de los lúpulos que se quieren suavizar.

A continuación se exponen las etapas que componen el proceso de elaboración de la cerveza, donde se puede apreciar que el agua es básica en este proceso y que un correcto acondicionamiento de la misma es algo básico.

1.1.- PROCESO DE ELABORACIÓN DE CERVEZA ARTESANA

-Molienda de la malta. El primer paso consiste en desmenuzar y triturar el grano de la malta. En este paso los granos de malta se introducen en el molino donde se comprimen entre los cilindros del mismo buscando conseguir una harina lo más fina posible, como se muestra en la Figura 1.1. Es muy importante respetar la cáscara y la envoltura de la malta lo máximo posible en la pulverización, porque estos componentes juegan un papel muy importante como lecho filtrante en el proceso de

clarificación del mosto y, si se destruyen, la clarificación no será óptima.



Figura 1.1: Malta molida

-Maceración. Una vez finalizada la molienda, el producto obtenido se saca del molino y se deposita en el tanque de maceración, es allí donde tiene lugar una de las etapas más importantes en el proceso de elaboración de la cerveza artesana, la obtención del extracto de la malta. Se pretende obtener la mayor cantidad posible y de la mejor calidad, en función del tipo de cerveza que se desea preparar, con el objeto de transformar el almidón de la malta en azúcares mediante procesos enzimáticos y bioquímicos naturales. En este punto comienza a apreciarse la importancia del agua, ya que es el medio utilizado para extraer el almidón de la malta y, gracias a sus características, ofrece un gran rendimiento, dando lugar a la materia prima con la que se elaborará la cerveza. Esta fase del proceso de elaboración se realiza en un macerador-hervidor como el de la Figura 1.2, donde se calienta agua a una temperatura entre 60 y 70 °C, dependiendo del tipo de cerveza a elaborar, y, posteriormente, se añade la malta molida.

Con la temperatura indicada se favorecen los procesos de extracción e hidrólisis enzimática. La etapa de maceración es un proceso que dura entre una y dos horas, resultando un mosto azucarado. Es importante que la temperatura del agua se mantenga estable, por ello, el macerador-hervidor utiliza vapor aportado por una caldera de vapor de alta eficiencia para conseguirlo. En esta fase es donde se decide el grado de alcohol y el cuerpo que tendrá la cerveza, ya que estos factores dependen de la concentración de azúcares presentes en el mosto. Según la cantidad de malta empleada y de la temperatura y el tiempo de maceración, que tendrán como resultado una mayor o menor cantidad de azúcares fermentables para ser transformados en alcohol durante la fermentación y más o menos azúcares no fermentables, que son los responsables del cuerpo y el carácter que tendrá la cerveza.

La transformación del almidón extraído de la malta en azúcar lo llevan a cabo varias enzimas que se producen de manera natural en el malteado.



Figura 1.2: Macerado de la malta

-Separación y agotamiento del bagazo. Una vez extraídas las materias solubles de la malta en el paso anterior, es el momento de separar el mosto de la parte insoluble de la malta, llamada bagazo. Se busca la mayor separación o agotamiento de la parte soluble de la malta para hacer el proceso lo más eficiente posible. La operación se realiza en dos fases en un dispositivo denominado lauter, mostrado en la Figura 1.3, donde llegan el mosto y el bagazo tras la maceración en el macerador-hervidor. En la primera fase se separa y clarifica el mosto del bagazo recirculando el líquido con las materias solubles a través del lecho formado por el propio bagazo (por este motivo es tan importante no destruir la cascara y la envoltura de la malta en el proceso de molienda) que se deposita sobre las ranuras del fondo del lauter. Una vez terminada la separación, se envía de nuevo el mosto al macerador-hervidor. En este momento se lleva a cabo la segunda fase de lavado del extracto que continúa retenido en el bagazo (agotamiento) mediante una ducha de agua caliente. El agua del lavado junto con el extracto que quedaba retenido en el bagazo se clarifica de la misma manera que el mosto y se envía al macerador-hervidor donde se mezcla con éste para continuar con el proceso. El sobrante de este proceso, el bagazo agotado, es un producto rico en fibra, proteína y minerales, por lo que se utiliza frecuentemente como alimento animal.



Figura 1.3: Lauter para separación del mosto

-Ebullición-Lupulización. Esta etapa tiene lugar en el macerador-hervidor y, en ella, se lleva a cabo una energética ebullición del mosto para estabilizarlo enzimática y microbiológicamente y coagular

las proteínas. Simultáneamente, con la ebullición, se consigue la esterilización del mosto. Por último, en este proceso se forman productos reductores como consecuencia de la ebullición que contribuyen a la calidad y estabilidad de la cerveza. En este punto del proceso es cuando se realiza el lupulado del mosto, consistente en la adición del lúpulo (Figura 1.4) al mosto durante a ebullición de éste. En función de la cantidad y la variedad del lúpulo, la cerveza tendrá un mayor o menor amargor, sabor y aroma a éste. La adición del lúpulo no se hace de una sola vez, sino que se van añadiendo progresivamente las distintas variedades seleccionadas a lo largo del proceso para que sus matices se vayan marcando en el mosto en el momento adecuado ya que, de otra forma, los matices se taparían unos a otros. Este proceso tiene una duración de entre una hora y media y dos horas.



Figura 1.4: Flores del lúpulo

-Clarificación y enfriamiento del mosto. El siguiente paso consiste en separar los restos de lúpulo y las partículas sólidas generadas durante la ebullición del mosto líquido. Este proceso se denomina clarificación y en él se somete al mosto contenido en el macerador-hervidor a un movimiento centrífugo, el cual genera un remolino que arrastra a las partículas sólidas hacia el centro y el fondo del macerador-hervidor. Tras dejar que las partículas decanten, una válvula situada en el centro del fondo del equipo se encarga de extraer las partículas sólidas. Una vez hervido el mosto y separadas las partículas, el líquido se encuentra a una temperatura aproximada de 95 °C por lo que, antes de pasar a la fermentación, hay que enfriarlo para que alcance la temperatura adecuada, permitiendo a las levaduras trabajar bien. Esta reducción de temperatura se lleva a cabo en un intercambiador de calor de doble efecto. En una primera fase, el mosto enviado al intercambiador se enfría desde los 95 °C hasta unos 25-30 °C, utilizando como fluido refrigerante agua que circula en contracorriente y que se va calentando al acoger el calor que se desprende del mosto. Esta agua que se ha calentado se recupera utilizándola en el proceso de agotamiento del bagazo o en la limpieza de los equipos, reduciendo el consumo energético y de agua de la cervecería. En una segunda fase, se enfriará el mosto desde los 25-30 °C hasta unos 10-22 °C que son necesarios para que las levaduras trabajen de manera óptima durante la fermentación de los diferentes tipos de cerveza.

-Primera fermentación. Esta etapa es la más importante del proceso de elaboración de la cerveza, junto con la maceración. El mosto enfriado en el intercambiador se transporta a un tanque de fermentación, como el que se observa en la Figura 1.5, y, simultáneamente, se oxigena para que las levaduras puedan crecer. Las levaduras son añadidas en el fermentador para que realicen la

fermentación o transformación de los azúcares en alcohol y anhídrido carbónico. Para que la temperatura de operación se mantenga constante entre los 10 y los 22 °C, se hace circular agua glicolada a través de una cámara de refrigeración que contiene el tanque de fermentación ya que, durante la fermentación, se genera calor que debe ser extraído para que no se alteren los sabores y características de los que se quiere dotar a la cerveza. Cuando la fermentación ha finalizado, las levaduras se retiran por una válvula que se encuentra en la parte inferior del tanque, para que su descomposición no afecte al sabor de la cerveza. En función del tipo de cerveza, la fermentación puede durar entre 5 y 20 días.

-Segunda fermentación y maduración en frío. Seguidamente, en el mismo fermentador, se realiza una segunda fermentación y maduración en frío, a una temperatura de entre -5 y -1 °C. La segunda fermentación durará entre 7 y 30 días, dependiendo del tipo de cerveza, y en este tiempo, las levaduras que han permanecido en la cerveza al no ser retiradas porque estaban suspendidas, se encargan de procesar algunos compuestos generados en la primera fermentación y que son indeseados por sus sabores y aromas.

También se eliminan en esta fermentación proteínas y otros compuestos que precipitan en frío, con lo que la cerveza se clarifica de forma natural. Los sólidos generados en este proceso, los turbios fríos, se eliminan al final por la misma válvula por la que se extrajo anteriormente la levadura de la primera fermentación. Una vez eliminados los turbios fríos se añade a la cerveza “verde”, mosto frío procedente de la clarificación y enfriamiento explicados anteriormente. Llegado este punto, a algunas cervezas se les somete a un lupulado en frío (dry hopping), para aumentar los frescos aromas a lúpulo.



Figura 1.5: Fermentador de cerveza

-Tercera fermentación y guarda extra. Se embotella la cerveza (Figura 1.6) y se almacena en una sala con temperatura controlada para que se produzca una tercera fermentación que transforma los azúcares del mosto añadido al final de la segunda fermentación en gas carbónico, que es el motivo por el que la cerveza tiene burbujas. Esta fermentación en el interior de la botella, en la que aún hay levadura, permite a la cerveza seguir desarrollando su carácter y envejecer durante el tiempo de guarda, que durará entre 3 semanas y varios meses, según la cerveza elaborada. Si la cerveza es sometida a una segunda o tercera fermentación en la botella pueden contener un depósito de levadura (vitamina B) o sedimento en el fondo de la misma. A pesar de su aspecto, este

sedimento indica que se ha dejado madurar a la cerveza de forma adecuada y que contiene sustancias beneficiosas para la salud.



Figura 1.6: Embotellado de cerveza

-Acabado y expedición. Una vez transcurrido el tiempo de guarda, hay que etiquetar las botellas y meterlas en cajas para poder ponerlas a la venta y que lleguen a los consumidores [1].

En la descripción de este proceso se puede apreciar que el agua es clave en la cerveza, no solo por ser su componente principal, sino porque es la base de su elaboración. Este líquido es el encargado de extraer las sustancias más importantes de materias primas como la malta o el lúpulo, que luego darán a la cerveza sus características principales. Si el agua no tiene un perfil adecuado, todo este trabajo puede estropearse debido a la aparición de compuesto, olores y/o sabores indeseados. Por ello, en toda cervecería, es clave disponer de un suministro de agua adecuado, de donde obtener un agua perfectamente tratada y con un perfil correcto para poder trabajar con ella.

1.2.- CERVECERÍAS ARTESANALES

El fenómeno de la producción artesana de cerveza se ha asentado claramente en España con un gran crecimiento en la última década pasando de 50 cervecías artesanas en el año 2010 a las más de 500 que se conocen en 2019 según la asociación española de cerveceros artesanales. Se consideran cervecías artesanales o microcervecías a aquellas con una producción mucho más pequeña que las grandes cervecías corporativas y cuyos dueños son independientes.

La mayoría de estas cervecías tienen una producción orientada al comercio, que puede oscilar entre los 1000 y los 6000 hectolitros anuales, como se refleja en la Tabla 1 [2].

El tiempo de producción de cada lote de cerveza varía en función de las cervecías y del tipo de cerveza pero, por norma general y atendiendo a la duración indicada en el apartado 1.1, se puede estimar de la siguiente forma:

- Las cinco primeras etapas (molienda, maceración, separación y agotamiento del bagazo, ebullición/lupulación y clarificación y enfriamiento del mosto) se realizan en unas pocas horas, por lo que en un día es posible terminar estas etapas.
- Cuando el mosto está preparado, se deja trabajar a las levaduras, que necesitarán entre 5 y 20 días para realizar la fermentación.
- La segunda fermentación y la maduración en frío necesitarán entre 7 y 30 días.
- La tercera fermentación y la guarda puede variar entre 3 semanas y varios meses.

El tiempo medio que necesita cada cerveza es de unos 3 meses, lo que se traduce en 4 lotes al año.

Tabla 1: Producción anual de las cerveceras artesanas españolas más importantes

MARCA	HECTOLITROS/AÑO (2015)
Socarrada, ER Boquerón, Toro	6000
La sagra, Burro de Sancho, Madrí	5000
La Virgen	3000
Montseny	2290
La Salve	2000
Dougal's	2000
Kadabra	1860
Cerex	1500
La Pirata, Imperial Stout Black Block	1500
Rosita	1300
Arriaca	1300
Mateo&Bernabé, Little Bichos	1288
Isleña	1110
Napar Pils, St. Germanus, Lght Raven	1000
Origen, S.XXI, Black IPA, Stout	950

2 ESTADO DEL ARTE

En este segundo apartado del trabajo se recogerá información relativa al Estado del Arte de las técnicas de acondicionamiento del agua para su posterior utilización como materia prima en la elaboración de cerveza artesana.

2.1.- TIPOS DE AGUA

Cualquier tipo de agua potable sirve para la fabricación de cerveza, no obstante, el producto final puede variar mucho en función de la que utilicemos. Para la fabricación artesanal de cerveza es muy común usar el agua de red o agua embotellada. En España hay más de 100 marcas de agua embotellada e incluso existe la Escuela Española de Cata de Agua, la cual forma a profesionales para saber apreciar los matices más valorados de este producto. Las aguas embotelladas, según su contenido en ciertos minerales, se definen como [3]:

- Aguas de mineralización débil. Tienen un residuo seco de hasta 50 mg/L.
- Aguas bicarbonatadas. Son aquellas que tienen más de 600 mg/L de bicarbonatos.
- Aguas sulfatadas. Son aguas que tienen más de 200 mg/L de sulfatos.
- Aguas cloruradas. Tienen más de 200 mg/L de cloruro.
- Aguas cálcicas. El contenido en calcio es de más 150 mg/L.
- Aguas magnésicas. Con un contenido de más de 50 mg/L de magnesio.
- Aguas fluoradas. Contienen más de 1 mg/L de fluoruros.
- Aguas ferruginosas. Las aguas que contienen más de 1 mg/L de hierro.
- Aguas sódicas. Su contenido de sodio supera los 200 mg/L.

Las propiedades de las cervezas más conocidas del mundo se deben al tipo de agua de la zona en concreto. Existen una serie de aguas que son las más famosas del mundo (para fabricación de cerveza) y cuyos perfiles serán los que se pretenderán alcanzar cuando se trate el agua de partida. En la Tabla 2 [4] vienen detalladas dichas aguas junto a su composición:

Tabla 2: Aguas de referencia

CIUDAD	Contenido en ppm del agua					
	Ca ²⁺	CO ₃ ²⁻	Cl ⁻	Mg ²⁺	Na ⁺	SO ₄ ²⁻
Burton	268	275	36	62	54	638
Dortmund	225	221	60	40	60	120
Dublín	119	156	19	4	10	53
Dusseldorf	40		45		25	80
Edimburgo	140	140	34	60	80	96
Colonia	104	152	109	15	52	86
Londres	90	82	10	6	22	24
London Well	52	104	34	32	86	32
Múnich	75	148	2	18	2	10
Pilsen	7	14	5	2	2	5
Viena	200	118	12	60	8	125

-El agua de Burton tiene una gran cantidad de sulfatos, los cuales potencian mucho el sabor de los lúpulos.

-El agua de Pilsen es muy blanda, casi no tiene minerales. Al tener un contenido en calcio tan bajo, será necesario hacer decocciones para ayudar a las enzimas a trabajar aunque el rango de pH no sea el adecuado y que puedan convertir los almidones en azúcares. Proporciona aroma a pan fresco y la falta de sulfatos equilibra el amargor del lúpulo.

-En Londres, Edimburgo, Viena, Dortmund, Colonia y Dusseldorf, el alto contenido en carbonatos equilibra las propiedades acidificantes de la malta oscura, el agua tiene un efecto tampón. En estas zonas las cervezas oscuras son muy conocidas. Por el contrario, si la malta es clara, no se alcanza un pH suficientemente ácido y los almidones no se transforman en azúcares, siendo necesaria la adición de ácido.

-El agua de Múnich es un agua moderada en minerales con alcalinidad alta. El bajo contenido en sulfato equilibra el amargor del lúpulo y hace que el aroma a malta sea dominante.

-En Dublín, el mayor contenido en bicarbonatos produce cervezas más oscuras y los bajos niveles de sodio, cloro y sulfatos aumentan el amargor.

Una vez seleccionada el agua que más interesa para la cerveza que se quiere fabricar, solo hay que añadir o quitar los iones necesarios para conseguir el perfil de dicha agua partiendo del agua de que se dispone. De esta forma se elimina el problema de no poder fabricar cervezas idénticas en

diferentes instalaciones alejadas unas de otras, ya que se puede conseguir un agua con la misma composición en ambos sitios.

2.2.- PARÁMETROS A CONTROLAR

Existen cuatro parámetros a controlar para que el proceso de elaboración de la cerveza se desarrolle de forma correcta:

pH.

Es un parámetro que afecta a la transformación de los almidones en azúcares y que debe estar entre los valores extremos 4 y 8. El valor más indicado es 7 para que en el macerado, donde se produce la reacción de los iones Ca^{2+} con los fosfatos de la cebada malteada que produce una acidificación, el pH se quede entre 5,2 y 5,6. El valor de pH óptimo en este periodo es 5,3 que permite que la actividad enzimática de las amilasas que transforman los almidones en azúcares se produzca adecuadamente. Cabe destacar que las maltas oscuras acidifican más que las maltas pálidas, por ello, las aguas duras con altas concentraciones de CO_3^{2-} son más adecuadas para estas maltas porque dificultan la acidificación. A esto se debe que las cervezas oscuras más famosas sean de zonas con aguas duras.

Los químicos expertos en elaboración de cerveza señalan que de todos los compuestos presentes en el agua, los principales causantes de cambios en el pH son tres, el bicarbonato, el calcio y el magnesio. El primero aumenta el pH y los dos últimos lo disminuyen. El efecto en el pH de los demás compuesto que contiene el agua es prácticamente despreciable. P.Kolbach desarrolló una ecuación para predecir el pH del agua de macerado en función de la cantidad de estos componentes, la cual indica cuanto se aleja el pH del que tendría si fuese agua destilada y se muestra en la Ecuación 1[5]:

$$pH = 5,8 + \left\{ 0,028 \times \left[\left(\frac{mg}{L} CaCO_3 \times 0,056 \right) - \left(\frac{mg}{L} Ca \times 0,04 \right) - \left(\frac{mg}{L} Mg \times 0,033 \right) \right] \right\} \quad (1)$$

Alcalinidad residual.

La alcalinidad residual es la medida de la alcalinidad que queda después de las reacciones que se producen con la dureza del agua (calcio y magnesio) y la alcalinidad. Es un indicativo de la resistencia al cambio del pH que tiene el agua empleada. Una alcalinidad residual alta implica que para cambiar el pH es necesario una gran cantidad de maltas o de aditivos, mientras que una alcalinidad residual baja indica que el pH es fácil de variar, pudiendo ser suficiente con la adición de grano. El valor de la alcalinidad residual se calcula en la Ecuación 2:

$$Alcalinidad\ residual \left(\frac{meq}{L} \right) = Alcalinidad \left(\frac{meq}{L} \right) - \left[\left(\frac{meq}{L} \right) \frac{Ca^{2+}}{3,5} + \left(\frac{meq}{L} \right) \frac{Mg^{2+}}{7} \right] \quad (2)$$

Donde la alcalinidad se obtiene de la Ecuación 3:

$$Alcalinidad = [OH^-] + [HCO_3^-] + 2 \cdot [CO_3^{2-}] \quad (3)$$

La alcalinidad residual también ayuda a predecir el color del macerado, ya que a mayor alcalinidad residual más oscura es la cerveza y a menor alcalinidad residual más clara es la cerveza. En la Figura 2.1 se muestra dicha relación [3]:

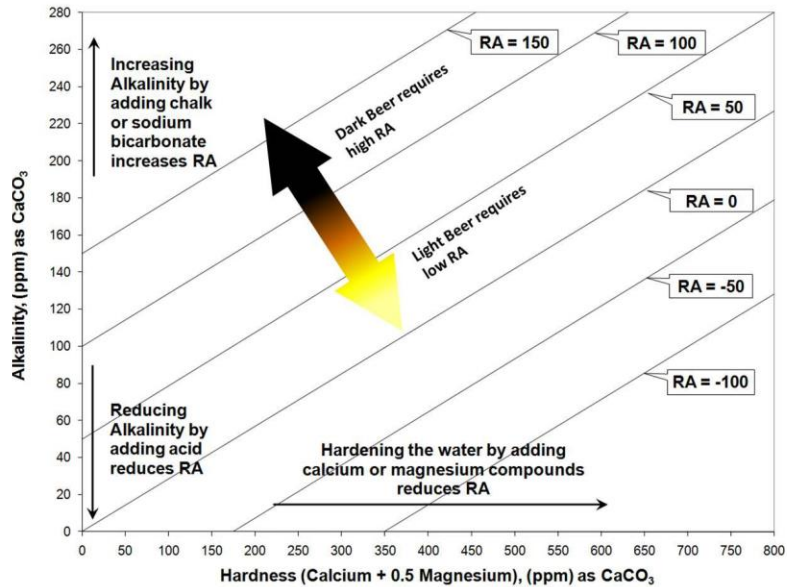


Figura 2.1: Relación alcalinidad residual-color de la cerveza

Dureza.

Conocida como la concentración de cationes Ca^{2+} y Mg^{2+} , es importante porque el calcio afecta mucho a la química del macerado. Para que se den las condiciones correctas la concentración de calcio tiene que ser, como mínimo, de 50 ppm. Si la concentración está por debajo de este valor, aparecerán problemas tanto en la maceración como en la fermentación posterior debido a que este elemento es imprescindible para el crecimiento de las levaduras que intervienen en el proceso. Hay dos tipos de dureza: la dureza temporal (asociada a Ca y Mg con carbonatos o bicarbonatos) y la dureza permanente (asociada a Ca y Mg con sulfatos o cloruros). La dureza temporal desaparece con el calentamiento, mientras que la dureza permanente requiere la adición de productos químicos para su eliminación.

Iones.

Carbonatos, calcio, sodio, magnesio, sulfatos y cloruros son los principales responsables de las características organolépticas de la cerveza.

- Calcio. Es elemento fundamental en la dureza del agua y, además, ayuda a bajar el pH hasta un rango óptimo. El nivel adecuado ronda las 100 ppm. No tiene sabor pero puede percibirse en boca sabor amargo áspero.
- Magnesio. Su concentración debe oscilar entre las 10 y 20 ppm. Un exceso de este ión genera un gusto áspero. Para cervezas oscuras, pequeñas cantidades de magnesio (en torno a 30 ppm) dan un buen sabor.
- Sulfatos. Son importantes si se pretende fabricar una cerveza con marcado sabor a lúpulo porque acentúan su amargor. Si su concentración es alta provocan sequedad y si se superan las 800 ppm pueden llegar a producir problemas intestinales.
- Fosfatos. Los fosfatos sirven para controlar el pH en el proceso de fabricación, como reducir el pH en el mosto en el hervor del lúpulo.
- Nitratos y nitritos. Aunque no tienen influencia en el sabor de la cerveza, si su concentración es excesiva, pueden provocar problemas de fermentación.

-Hierro. Éste mineral puede dar sabores metálicos a la cerveza y, si su concentración es superior a los 0,2 mg/L, obstaculiza la actividad de la levadura.

-Cobre. Es un elemento a tener muy en cuenta, ya que en concentraciones de solo 0,1 mg/L puede actuar como catalizador de reacciones de oxidación irreversibles y en niveles superiores a 10 mg/L es tóxico para la levadura.

-Sodio. Contribuye al cuerpo y al carácter de la cerveza. Es ideal para cervezas con mayor sabor a malta ya que potencian el dulzor. Si se superan las 150 puede dar lugar a gusto salado, como de “agua de mar”.

-Carbonatos. Tienen un papel fundamental en la alcalinidad por la neutralización de los ácidos de las maltas. Un defecto producirá un pH bajo en el macerado y un exceso contrarrestará la acidificación necesaria para la extracción del grano malteado.

-Cloruros. Proporcionan dulzor y maltosidad si están en bajas concentraciones. No se deben superar las 150 ppm porque aparecen problemas de corrosión que pueden causar deterioro de la instalación. Si la concentración supera las 300 ppm, obstaculizan la floculación de la levadura. Si se supera un nivel de 400 ppm perjudica al sabor de la cerveza. En caso de sobrepasar las 500 ppm aparecen problemas de fermentación debido a las levaduras.

Los carbonatos se obtienen del yeso (CaCO_3), los sulfatos se obtienen de sulfato magnésico o sulfato cálcico que, al disolverse en agua, se disocian y los cloruros se obtienen de cloruro magnésico, cloruro cálcico o cloruro sódico, de la misma forma que los sulfatos.

Existe un quinto parámetro que, si bien no es tan importante como los anteriores, sirve de orientación para saber las proporciones en función del tipo de cerveza que se quiere fabricar. Se trata del ratio sulfatos/cloruros. Un ratio 2/1 es propicio para cervezas con marcado sabor a lúpulo en las que se potencia el amargor, un ratio $\frac{1}{2}$ es adecuado para cervezas maltosas y un ratio 1/3 en caso de que la cerveza sea negra. El sulfato afecta al sabor entre las 50 y 500 ppm, el cloruro lo hace entre las 50 y 200 ppm. Las cervezas pálidas se ven más afectadas por los sulfatos [6].

2.3.- TRATAMIENTOS DEL AGUA EN LA FABRICACIÓN DE CERVEZA

El primer paso es conocer el perfil del agua entrante con la que se va a fabricar la cerveza. Para ello, además de medir los cuatro parámetros más importantes mencionados anteriormente (pH, alcalinidad, dureza e iones), hay que controlar la presencia de pesticidas, herbicidas, metales y otros compuestos que puedan ser tóxicos.

Para el control de microorganismos lo más indicado es hacer una cloración para la eliminación de los mismos. Esto implica que sea necesario realizar una decloración posterior. La decloración se lleva a cabo con carbón activo que actúa como catalizador de una reacción re-dox en la que el cloro se reduce a cloruros. Este proceso ocupa centros activos del carbón, aunque hay óxidos superficiales y materia orgánica que también los ocupan, hasta que el carbón se agota y hay que regenerarlo. Sin embargo, lo más común en las cervecerías artesanas es emplear agua de red ya tratada o agua mineral, de forma que la eliminación de microorganismos no es necesaria, solo habría que declorar en caso de que la concentración de cloro fuera excesiva.

El siguiente parámetro a controlar es el pH. Para corregirlo se pueden agregar maltas especiales, agregar sales o seguir otros procedimientos. Usando maltas especiales como caramelos, chocolates o maltas tostadas, se puede bajar el pH hasta 0,5 puntos. Para cervezas pálidas se pueden añadir sales de calcio como el sulfato cálcico (yeso) o sulfato de magnesio (sales Epsom). Si el pH del agua está muy lejos del deseado, estas opciones no son suficientes y hay que recurrir otros procedimientos como agregar agua destilada para diluir, hervir el agua para reducir la alcalinidad y

que sea más fácil que cambie el pH o, como opción más drástica, agregar ácidos alimenticios como el cítrico, el fosfórico o el láctico. La adición de ácidos debe hacerse con mucho cuidado porque, al venir muy concentrados, es fácil añadir demasiado y acidificar en exceso.

En cuanto a la alcalinidad, la forma más común de reducción en la producción cervecera es la cocción del agua, ya que provoca que el bicarbonato reaccione con el calcio presente en el agua y precipite, reduciendo la concentración de bicarbonato. Para potenciar esta reacción se añade calcio a través de yeso (CaSO_4) o de cloruro cálcico (CaCl_2). Otra opción es la adición de magnesio que también reacciona con el HCO_3^- utilizando sulfato magnésico (MgSO_4). Sin embargo hay que tener en cuenta las concentraciones máximas de calcio y magnesio que no afectan al proceso de elaboración (150 ppm y 50 ppm respectivamente). Si, por el contrario, se pretende aumentar la alcalinidad lo que se busca es la adición de HCO_3^- , la cual se consigue con bicarbonato de sodio (NaHCO_3) o con cal apagada (CaOH). Incluso en algunos casos se puede usar tiza (CaHCO_3) aunque con el inconveniente de que su disolución es más complicada. Del mismo modo que cuando se añaden calcio y magnesio, hay que controlar que el bicarbonato y el calcio no superen las concentraciones máximas (250 ppm y 150 ppm respectivamente).

La dureza se puede aumentar o disminuir. Para reducirla se puede cocer o ebulir el agua de forma que las sales se unen y se pueden separar del agua con una simple decantación, también se puede realizar una ósmosis, aunque este proceso puede ser más costoso, y otra opción es destilar el agua, lo cual puede hacerse con relativa facilidad aunque es menos efectivo que lo anterior. Para aumentarla se recurre a la adición directa de sales de calcio y magnesio que, al disolverse en el agua, liberan cationes Ca^{2+} y Mg^{2+} .

Por último hay que controlar los iones disueltos, lo más sencillo es partir de agua con baja concentración, como puede ser agua mineral o agua destilada, e ir añadiendo los iones para obtener el perfil deseado. Hay que tener en cuenta que los iones no se encuentran solos, sino que hay que añadirlos combinados con otros elementos y conocer cuál es su concentración en esos elementos. Por ejemplo, al añadir 100 mg de CaCO_3 , no se están añadiendo 100 mg de Ca^{2+} y otros tantos de CO_3^{2-} , sino que se añaden 40 mg de Ca^{2+} y 60 mg de CO_3^{2-} [7].

3 OBJETIVOS

El objetivo de este proyecto es seleccionar y tratar el agua de forma adecuadas para conseguir una buena cerveza. Se partirá de una situación inicial del agua (**composición que tiene el agua de que se dispone**) para alcanzar una situación final (**composición que debe tener el agua para que la cerveza tenga las características deseadas**).

Se trata de acondicionar dos tipos de agua diferentes para la producción de dos tipos de cerveza con características muy distantes la una de la otra para poder comparar el tratamiento que necesita el agua para producir una y otra cerveza y la cantidad de sales que hay que añadir a una y otra para conseguir los perfiles seleccionados, ya que éstos se encuentran en límites opuestos, muy pobre en sales (Pilsen) y muy cargado de sales (Dortmund).

Para conseguir lo anterior se selecciona el método de tratamiento del agua para cada tipo de cerveza y el volumen de producción. También se determina el alcance y la localización de la planta de tratamiento de agua.

-Método de tratamiento de agua para cada tipo de cerveza. El método de tratamiento es diferente para cada tipo de agua, ya que sus condiciones no son las mismas debido al punto de obtención.

- Una de las aguas se obtiene de un pozo y cuenta con una importante cantidad de sales y microorganismo por lo que es necesario someterla a una descalcificación y a una cloración para eliminar dichos elementos, los cuales no solo pueden perjudicar las características de la cerveza sino que existe una alta probabilidad de que sean dañinos para la salud de las personas que consuman las cervezas. Una vez descalcificada y clorada el agua, se somete a un proceso de osmotización que extrae todas las sales disueltas y proporciona un perfil semejante al del agua destilada.
- El segundo tipo de agua procede de la red de suministro local y se encuentra exenta de microorganismos, por lo que no necesita ser sometida a descalcificación y cloración. Sin embargo, si se somete el agua a ósmosis inversa para extraer las sales. Con la ósmosis inversa se busca simplificar el proceso de tratamiento y encontrar un punto en el que ambas aguas tienen un perfil igual, sin sales, a partir del cual se busca alcanzar los dos perfiles de aguas famosas seleccionados. Esto permite apreciar de forma más clara las diferencias en las necesidades de sales de cada perfil.

- Los dos perfiles de agua que se van a reproducir son el de Pilsen y el de Dortmund:
- El agua de Pilsen es muy blanda y casi no tiene minerales, lo que la hace adecuada para una cerveza rubia con marcado sabor a lúpulo. El ratio sulfatos/cloruros que se va a ajustar es de 2/1 que acentúa el sabor a lúpulo.
- El agua de Dortmund tiene un alto contenido en carbonatos que produce un efecto tampón que equilibra las propiedades acidificantes de las maltas oscuras que la hacen ideal para cervezas negras. Se va a ajustar un ratio sulfatos/cloruros de 1/3 que es el indicado para cervezas negras.

-Selección de una producción de cerveza. En este trabajo se ha seleccionado un volumen de producción de cerveza de 100 m³ por lote (3 meses por lote aproximadamente), lo que conlleva una producción anual de 4000 hectolitros. Este volumen constituiría una producción importante a nivel nacional, como puede apreciarse en la Tabla 1, donde las mayores cervecerías tienen una producción aproximada de 6000 hectolitros al año y las más pequeñas rondan los 950 hectolitros anuales.

-Alcance y localización de la planta de acondicionamiento de agua. Como se ha comentado con anterioridad, el alcance de este trabajo irá desde la toma de agua de la red de suministro (bien sea de la propia red o del pozo) hasta que se acondiciona totalmente con la adición de sales para alcanzar los perfiles deseados y el agua está preparada para ser utilizada en la elaboración de cerveza.

La localización de la planta se establecerá en la localidad de Santibáñez de Béjar, provincia de Salamanca, ya que los puntos de extracción de las aguas seleccionadas para el proyecto se encuentran en dicha población.

4 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO

En este punto se hace una descripción detallada de todo el proceso de tratamiento al que es sometida el agua antes de llegar a la cervecería, explicando los pasos a seguir en cada punto de la planta. Al final se adjunta un plano de la misma para facilitar la comprensión del proceso.

4.1.-DESCRIPCIÓN DEL FUNCIONAMIENTO DE LA PLANTA

En la Figura 4.1, se muestra un diagrama de la planta:

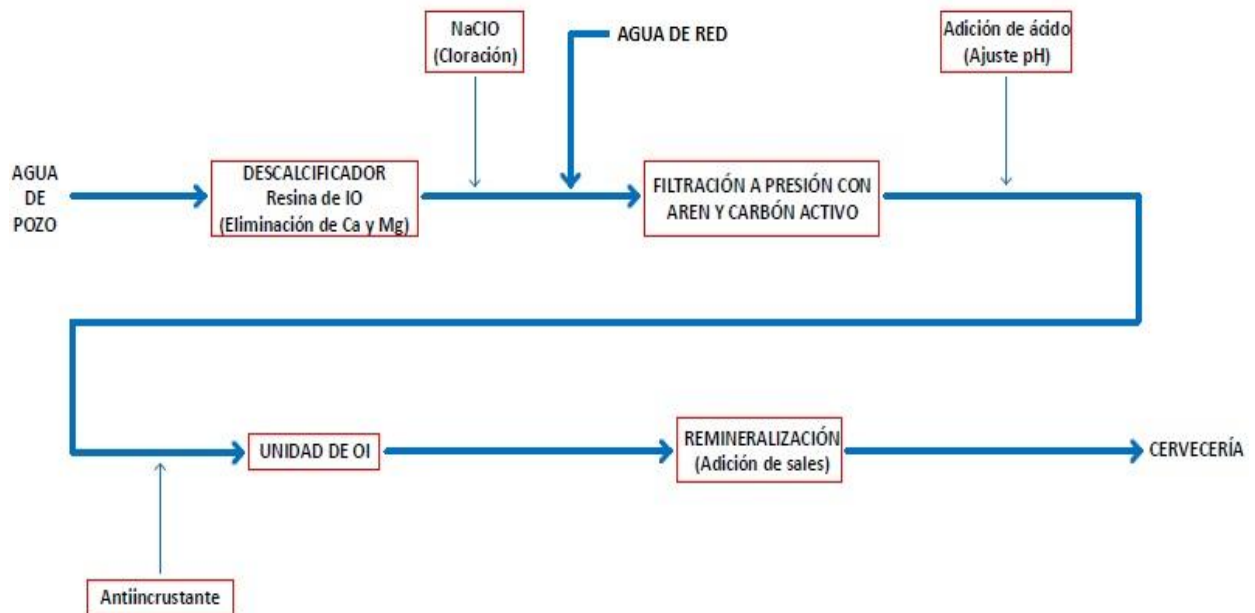


Figura 4.1: Diagrama general de la planta

La planta se está conectada a los dos puntos de obtención del agua y, con la ayuda de dos llaves de paso manuales, se elige el tipo de agua que se desea tratar.

El agua de pozo se alimenta en el inicio de la planta y llega a las dos primeras partes del tratamiento, que son exclusivas para este tipo de agua, la descalcificación y la cloración. El agua de

red, por su parte, se incorpora a la planta después de la cloración. Llegados a este punto, el tratamiento es el mismo independientemente del tipo de agua: se filtra con arena y carbón activo, se añaden los químicos requeridos por las membranas y se realizan mediciones para comprobar que el agua se encuentra apta para que la reciban las membranas, se realiza la ósmosis en los vasos de presión que contienen a las membranas y, por último, se procede a la remineralización.

La remineralización del agua, aunque es un proceso común, varía según la cerveza que se vaya a elaborar. En este punto la planta presenta flexibilidad y permite adaptar ambos tipos de agua para producir cualquiera de los dos tipos de cerveza propuestos adoptando un perfil Pilsen o un perfil Dortmund. Para ello se ha planteado un diseño que consta de un tanque agitado al cual se conectan unos depósitos dotados de bombas dosificadoras que añaden compuestos químicos que dan al agua un perfil u otro. Se cuenta con seis depósitos que contienen CaCO_3 , NaHCO_3 , CaSO_4 , CaCl_2 , MgSO_4 y NaCl . El agua de Pilsen solo necesita CaCO_3 , NaHCO_3 , MgSO_4 y NaCl , mientras que el agua de Dortmund requiere los seis compuestos. Con un máximo de seis depósitos pueden alcanzarse ambos perfiles. El agua de Pilsen, con menos carga de minerales, es apta para cervezas claras. En el caso contrario se encuentra el agua de Dortmund, con una carga de sales mucho mayor, que la convierten en idónea para cervezas oscuras.

Una vez alcanzado el perfil de agua deseado, el agua está lista para ser suministrada a la cervecería.

De esta forma, es posible adaptar el uso de una sola línea de tratamiento a las necesidades de ambos tipos de agua, empleando los mismos equipos para los tratamientos comunes y reduciendo considerablemente costes y espacio.

4.2.-CARACTERÍSTICAS DEL AGUA A TRATAR

La localización de la planta se encuentra en Santibáñez de Béjar, provincia de Salamanca. Los dos puntos de extracción de agua pertenecen a dicha localidad, el agua de red del municipio y agua de un pozo de una vivienda privada.

En la Tabla 3 se muestra el análisis del agua de pozo realizado por el laboratorio Biorama con sede en la vecina localidad de Guijuelo, en el que se exponen parámetros como el pH, la conductividad o el cloro residual. A esta agua se le va a realizar un tratamiento con cloro para eliminar los posibles microorganismos.

En la Tabla 4 se presenta un análisis del agua de red de la localidad, facilitada por el ayuntamiento y realizada por el laboratorio Aquimisa, situado en la ciudad de Salamanca. En dicho análisis, además de registrarse los parámetros del agua, se indica que cumple con los requisitos establecidos en el RD 140/2003, lo que la convierte en apta para el consumo humano.

Atendiendo a los análisis realizados al agua, se confirma el planteamiento establecido en el punto cuatro de este documento, en el que se explica el diferente tratamiento que recibirán ambos tipos de agua, siendo necesaria una cloración y descalcificación del agua de pozo e incorporándose después de estos procesos el agua de red a la planta.

Tabla 3: Agua de pozo

Informe Nº	10-009154	Muestra	Agua
Referencia	003047631	Contenida en	Envase estéril
Fecha recepción	29/07/19	Técnico	0035
Fecha análisis	29/07/19	Lugar de recogida	Santibáñez de Béjar
Tª recepción	4.0 °C	Método	(1)
ANÁLISIS FÍSICO-QUÍMICO			
Determinación	Método (1)	Resultados	Límites
Olor	PT-42	0	3 a 25 °C
Sabor	PT-43	0	3 a 25 °C
Color	PT-41	0	15 mg/l Pt/Co
Turbidez	PT-49	0	5 UNF
pH	PT-44	7,42	Mín: 6,5 ; Máx: 9,5
Conductividad (20°C)	PT-45	1302	2500 µs/cm ⁻¹
Amonio	PT-47	<0,2	0,5 mg/l
Cloro residual	PT-48	<0,01	1 mg/l
ANÁLISIS MICROBIOLÓGICO			
Determinación	Método	Resultados	Límites
Eschrichia Coli	PT-22	18	0 ufc/100 ml
Coliformes	PT-23	36	0 ufc/100 ml
Gérmenes a 22°C	PT-21	305	100 ufc/ml
Cl. Perfringes	PT-24	4	0 ufc/100 ml
OBSERVACIONES: Muestra recepcionada en laboratorio			
RECOMENDACIONES: Se aconseja clorar el agua antes de su consumo			

Tabla 4: Agua de Red

Nº de muestra:	19_415035	Nº de boletín:	02996082//704876
Recibida el:	26/03/2019	Lugar de recogida:	Santibáñez de Bejar
Inicio del ensayo:	26/03/2019	Final del ensayo:	29/03/2019
DATOS IDENTIFICATIVOS DE LA MUESTRA (Análisis INICIAL-SINAC):			
Cod P,M:	23718	Biocida:(*)	Hipoclorito sódico
Punto T,M:(*)	PM-DEP SANTIBÁÑEZ DE BÉJAR	Tipo de análisis:(*)	21
(*) Fecha T,M:	26/03/19	Visibilidad PE	1
Hora T,M:(*)	08:47	Observaciones:(*)	Muestra con /sin tiosulfato
Núcleo de Población:	SANTIBÁÑEZ DE BÉJAR		
RESULTADOS ANALÍTICOS			
Ensayos	Resultados	Método	Legislación
E. Coli	0 ufc/100 ml	PEM159	0
*Clostridium Perfringens	0 ufc/100 ml	PEM1317	0
Coliformes totales	0 ufc/100 ml	PEM159	0
Bacterias aerobias a 22°C	<1 ufc/ml	PEM155	<=10·10 ²
Amonio	0,09 mg/l	PE-Q66	<=0,5
Color	<5 Mg Pt/Co	PE-Q120	<=15
Conductividad	<50 µs/cm a 20°C	PE-Q81	<=2500
*Olor	<3	PE-Q133	<=3
pH	6,9	PE-Q10	6,5-9,5
*Sabor	<3	PE-Q100	<=3
Turbidez	<0,5 UNF	PE-Q82	<=1,0
*Cloro libre residual	0,37 mg/l	In situ	<=1,0
*Aluminio	<10 µg/l	PEM958	
*Informe Técnico: cumple los límites marcados en el R.D. 140/2003 en los parámetros analizados			

4.3.-DESCALCIFICACIÓN

El primer tratamiento que se aplica al agua es la descalcificación, como puede observarse en la Figura 4.2.

Este proceso, junto con la cloración y la adición de antiincrustante, son muy importantes, no solo para garantizar las condiciones del agua y hacerla apta para el consumo humano y la fabricación de cerveza, sino también para mejorar el rendimiento de la planta, ya que es básico preparar el agua para su llegada a las membranas, las cuales son muy sensibles a la incrustación y ensuciamiento. Si el agua no llega en las condiciones adecuadas se disminuye el rendimiento de las membranas y aumenta los costes de operación al hacer necesaria una mayor frecuencia de limpieza o al llegar incluso a requerir la sustitución de las mismas. Aunque es a las membranas a las que más pueden afectar estos factores, también pueden verse afectadas otras partes de la planta como tuberías o equipos, en los que también puede depositarse una cantidad considerable de suciedad.

El aspecto que más afecta y que se aborda en este primer elemento de la planta es la dureza del agua.

Para reducirla y que se encuentre en un valor adecuado se van a emplear resinas de intercambio iónico presentes en un descalcificador.

El descalcificador automático (D1 y D2) que se va a instalar es dúplex, consta de dos columnas, controlado por volumen. Al tener dos columnas, se garantiza el funcionamiento de forma continua, ya que si es necesario realizar una limpieza o surge una avería de una de las columnas se puede seguir trabajando con la otra durante la regeneración o reparación. De esta forma, se puede funcionar sin interrupciones durante largos periodos de tiempo. El control por volumen consiste en un contador de volumen de agua integrado en el equipo que avisa cuando es necesario regenerar la resina reduciendo los requerimientos de mantenimiento al mínimo y evitando que sea necesaria una vigilancia continua. Únicamente hay que reponer las pastillas de sal que intervienen en la regeneración de la resina. Tras el descalcificador, se cuenta con un medidor de dureza (I-1) que sirve para supervisar la adecuada actuación del equipo anterior.

4.4.-CLORACIÓN

Después del medidor de dureza, una vez adecuada la dureza del agua es necesario llevar a cabo la cloración recomendada por el laboratorio, la cual se realizará por dosificación de hipoclorito de sodio. Con esta acción se busca eliminar los patógenos que hayan quedado en el agua tras la descalcificación y que la hacen inapropiada para el consumo humano.

La cloración es recomendable antes del filtrado porque deja el agua más cristalina y facilita el proceso de filtración.

En la tubería principal se coloca un medidor de caudal (FI-1) que determina la cantidad de hipoclorito sódico que hay que añadir, lo cual se lleva a cabo enviando una señal a la bomba dosificadora de hipoclorito sódico (B-6).

El hipoclorito de sodio actúa oxidando los cuerpos presentes en el agua, sobre los iones ferrosos y manganesos, sobre el amoníaco si la cantidad no es excesiva (puede dar lugar a dosis altas de oxidante residual y gases explosivos), sobre los nitritos convirtiéndolos en nitratos, sobre la materia orgánica oxidable y sobre los microorganismos.

Para que la destrucción de los microorganismos y la eliminación de las bacterias sea total, es recomendable añadir una dosis de cloro ligeramente por encima del punto crítico siempre que sea posible y no dé lugar a dosis de cloro demasiado altas.

La acción del cloro es muy rápida y es efectivo en los minutos siguientes a la inyección en la tubería de agua. El cloro residual que quede tras el proceso será retenido por el carbón activo del filtro para evitar que llegue a las membranas, ya que podría deteriorarlas e, incluso, inutilizarlas.

Una vez añadido el cloro es importante que se mezcle con el agua de forma adecuada para que quede una mezcla homogénea, por ello se instala un mezclador estático (M-1).

4.5.-FILTRACIÓN

Una vez mezclado el hipoclorito con el agua en el mezclador, se procede a la filtración.

El proceso de filtración se encarga de eliminar del agua partículas en suspensión y coloides, así como el cloro residual procedente de la etapa de filtración. Con la acción de los filtros se consigue que el agua se encuentre en unas condiciones adecuadas para llegar a las membranas de ósmosis inversa y que su rendimiento sea óptimo. También se consigue aumentar en gran medida la calidad del agua.

La filtración consiste en una separación física en la que se hace pasar el agua por un lecho filtrante donde quedan retenidas las partículas y el agua sale libre de sólidos para ser utilizada en el siguiente proceso.

El filtro empleado es un filtro a presión (F-1) por lo que es necesario bombear el agua antes de entrar en el mismo. Se trata de un filtro vertical al que se realizará un lavado en contracorriente cuando se sature el lecho.

Otra característica de este equipo son las múltiples capas. Primero tiene una capa de arena que será la encargada de la retención de los sólidos en suspensión y la materia coloidal y, a continuación, se encuentra el filtro de carbón activo que retendrá el cloro libre residual.

Los sólidos que deben separarse en el filtro de arena pueden encontrarse en el agua como sólidos disueltos, que son sales orgánicas e inorgánicas disueltas en el agua que no provocan turbidez, o como sólidos en suspensión. Éstos últimos pueden ser de varios tipos:

-Microsólidos. Son los mayores responsables de la turbidez del agua. Pueden provenir de la erosión del suelo y de las rocas, de partículas de materia orgánica o de microorganismos.

-Macrosólidos. Son de mayor tamaño, más de 100 micras.

La otra sustancia que debe retenerse en el filtro es el cloro libre residual, ya que los fabricantes de membranas remarcan la importancia de mantener este parámetro bajo control para evitar que las membranas sufran daños por oxidación que serían irreversibles. Aunque el cloro libre residual también puede eliminarse con la adición de un agente reductor como el bisulfito sódico, se ha descartado esta posibilidad porque el fabricante recomienda el empleo de filtro de carbón activo. La ventaja que presentan estos filtros es la capacidad de eliminar, además del cloro libre residual, los compuestos orgánicos que hayan podido atravesar el filtro de arena. La desventaja que presentan estos filtros es la posibilidad de criar bacterias que contaminan biológicamente las membranas de ósmosis inversa, lo que hace muy importante el control del contralavado para evitar que esto suceda.

En base a lo anterior, el diseño del filtro consiste en un lecho mixto de arena y carbón activo. Los materiales filtrantes deben tener diferentes granulometrías y densidades, colocándose el material de mayor densidad y menor granulometría (carbón activo) en el fondo y el material de menor densidad y mayor granulometría (arena) en la parte superior. Esta diferencia es necesaria para que, después de realizarse el contralavado, los materiales se reubiquen adecuadamente y no se mezclen en el lecho.

La altura del lecho filtrante depende del tipo de filtro y es importante dejar un espacio entre la superficie del carbón activo y la base del deflector denominado cámara de expansión ya que, de no existir este espacio, se puede dar lugar a la formación de pequeñas partículas de arena debido al choque entre el carbón activo y el deflector y las fugas de arena por el colector de drenaje.

Otro factor a tener en cuenta es la velocidad de lavado del filtro, puesto que si es excesiva es una causa frecuente de fuga de arena del filtro. Dicha velocidad debe encontrarse entre 20 y 50 m/h. En cuanto a la velocidad de paso del agua a través del filtro debe ser inferior a 15 m/h, incluso algunos fabricantes recomiendan que sea inferior a 10 m/h [8].

4.6.-ADICIÓN DE COMPUESTOS QUÍMICOS

A la salida del filtro, es necesario controlar el pH del agua antes de que llegue a las membranas de ósmosis inversa, pues un pH bajo disminuye la capacidad de incrustación de CaCO_3 , factor que se mide con el índice de saturación de Langelier (LSI). A pH elevados, por encima de 7,7 el agua se vuelve más incrustante y el LSI tiene valores mayores. A pH por debajo de 7,3, el agua es más corrosiva y el LSI adquiere valores menores. El LSI de tener valores entre -0,5 y 0,5.

Los ácidos más comúnmente empleados para el control del pH son el ácido clorhídrico (HCl) y el ácido sulfúrico (H_2SO_4). El ácido clorhídrico se emplea cuando hay que controlar el sulfato de calcio, de bario o de estroncio, ya que si se utiliza el ácido sulfúrico en estos casos se incrementa el ión sulfato en el agua de entrada y aumenta el riesgo de incrustación. Para el resto de casos es más usado el ácido sulfúrico, con costes de operación más bajos y menores emisiones de gases a la atmósfera, es menos corrosivo y el rechazo del ión sulfato en las membranas es mejor que el del ión cloruro. Por todo esto, el ácido que se dosificará será ácido sulfúrico con una concentración del 96%. Esta tarea la realizará la bomba B-7.

Otro factor a controlar es la incrustación de sales en los conductos de la planta. Los antiincrustantes son sustancias que inhiben la precipitación y cristalización de sales minerales. En este caso que quiere evitar la precipitación de CaCO_3 . La adición se realiza con la bomba B-8 después de la inyección del ácido porque, aunque los pH bajos pueden minimizar su eficacia, no es el caso.

El control de la adición de antiincrustante es crucial puesto que un exceso de esta sustancia puede provocar depósitos en las membranas generando problemas de ensuciamiento y disminuyendo su rendimiento.

Al igual que se hizo con el hipoclorito de sodio, se instala un mezclador (M-2) para que las sustancias químicas y el agua formen un conjunto homogéneo.

4.7.-MEDIDA DE PARÁMETROS PREVIA A LA ÓSMOSIS INVERSA

Una vez homogeneizado el conjunto en el mezclador, es bueno asegurarse de que no ha quedado cloro residual libre antes de entrar en la unidad de ósmosis inversa, por ello se recomienda realizar una medida de ajuste. Esta medida puede hacerse con un monitor de cloro libre que mide la concentración residual de bisulfito o con un monitor de potencial de oxidación-reducción. El fabricante de membranas recomienda la segunda opción, equipar a la planta con un medidor de potencial de oxidación-reducción (OI-1). Dicho equipo debe medir de manera continua el potencial de oxidación-reducción del agua que entre en las membranas, el cual debe estar por debajo de los 300 mV, en caso contrario debe mandar un aviso de nivel inadecuado de oxidante.

También se instalará, previo a la entrada de la unidad de ósmosis inversa y en línea con el anterior, un medidor de turbidez (I-2) que se asegure de que no se sobrepasen los 0,5 NTU recomendados por el fabricante. La instalación se hará en un bypass de la tubería principal de agua.

Junto con estos dos medidores, se instalará otros dos, un medidor de pH (GI-1) y otro de

conductividad (CI-1).

4.8.-ÓSMOSIS INVERSA

Una vez adecuada el agua y tomadas las medidas, se llega a uno de los puntos más delicados de la instalación: la unidad de ósmosis inversa.

Como primera medida de seguridad para las membranas se encuentran dos filtros de cartucho (F-2 y F-3) que capturan las partículas que hayan podido escarpar de la unidad de filtración y que constituyen un peligro para las membranas. También se cuenta con dos indicadores de presión (PI-3 y PI-4) para saber cuándo es necesario cambiar los cartuchos.

Cuando el agua esté libre de peligros para las membranas, es necesario impulsarla con una bomba (B-9) para que el rendimiento de las membranas sea adecuado.

En una unidad de ósmosis inversa, hay tres tipos de caudales:

-Caudal de permeado. Es el caudal de agua que sale de la unidad de ósmosis con baja concentración de sales.

-Caudal de concentrado. Es el caudal de agua que sale del proceso con una concentración de sales elevada.

La unidad está constituida por cuatro vasos de presión (VP-1 a VP-4) los dos primeros con tres membranas y los dos segundos con dos membranas. Los dos primeros vasos trabajan en paralelo, mientras que los dos segundos lo hacen en serie.

Parte del concentrado que rechazan las membranas se recircula a la entrada de los vasos de presión para desperdiciar menos agua y mejorar la recuperación.

A la salida de los vasos de presión se tienen dos caudalímetros (CM-1 y CM-2) que indican el rendimiento de las membranas y cuando es necesario limpiarlas.

Para la limpieza de las membranas se cuenta con un depósito (DP-4) en el que se almacena agua procedente del permeado de las membranas, la cual se emplea para aclarar las mismas. El tanque tiene dos indicadores de nivel máximo (LI-1) y mínimo (LI-2) y, a su salida, una bomba (B-10) se encarga de impulsar el agua hacia las membranas.

Al igual que a la entrada, a la salida de la unidad de ósmosis se cuenta con una llave para toma de muestras y con instrumentación para registrar los parámetros del agua.

4.9.-REMINERALIZACIÓN

Cuando el agua sale de la ósmosis, una vez que ha sido tratada adecuadamente y se ha eliminado todo el contenido residual, en la parte final de la planta se encuentra con la unidad encargada de dar al agua el perfil deseado.

El agua llega a un tanque dotado de una varilla de agitación (A-1). Una vez lleno el tanque, se añaden las sales que dan al agua el perfil seleccionado. Para ello, se cuenta con un sistema de dosificación formado por seis tolvas dosificadoras (T-1 a T-6) que añaden la cantidad necesaria de cada sal al tanque de agua con la ayuda del medidor de caudal (FI-5).

El tanque tiene un controlador de temperatura (TC-1) para controlar la temperatura del agua, factor clave para que la disolución de las sales en el agua sea óptima.

Al final de la unidad se tiene la última toma de muestras e instrumentación de control para poder comprobar que el agua se encuentra en unos parámetros óptimos antes de ser alimentada a la cervecería, como puede apreciarse en la Figura 4.2.

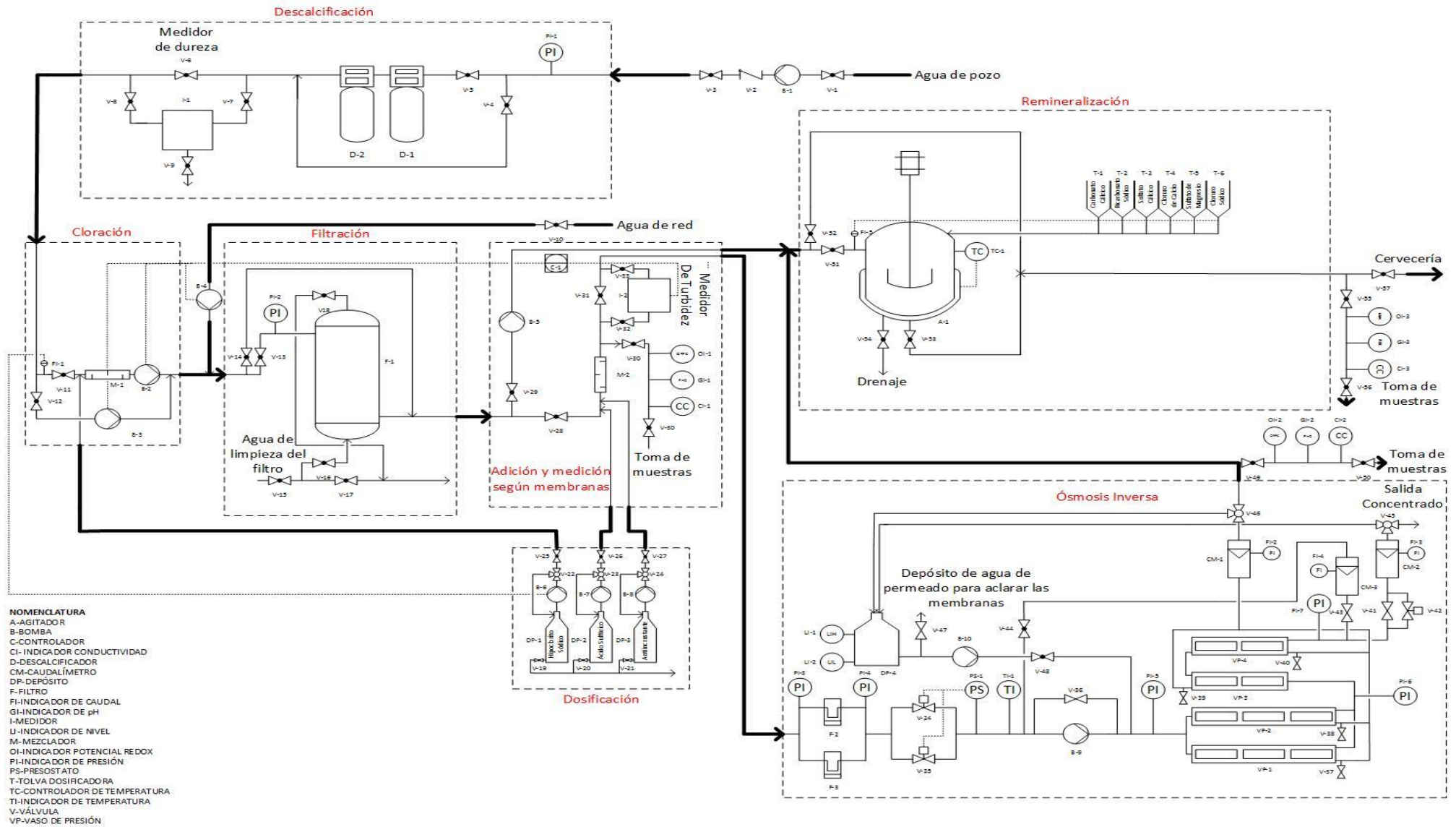


Figura 4.2: P&ID de la planta

5 CÁLCULO DE EQUIPOS

A continuación se presentan los cálculos que se han realizado para el diseño de cada uno de los equipos presentes en la planta, incluyendo las ecuaciones y experiencias realizadas para la obtención de los resultados.

5.1.-DESCALCIFICACIÓN

En primer lugar se va a imponer un caudal de suministro de agua que debe impulsar la bomba de 10 m³/h. Por seguridad, el caudal de la bomba debe ser un 50% mayor, por lo que el caudal será de 15 m³/h.

Seguidamente se va a definir la capacidad que va a necesitar cada descalcificador. Para ello hay que conocer la dureza del agua, expresada en grados hidrotimétricos franceses (10 mg CaCO₃/L de agua), tal y como se muestra en la Tabla 5. Como en el análisis no aparece tal dato, se ha obtenido consultando al laboratorio Biorama, que ha proporcionado un dato de dureza de 27,8 °dH.

Tabla 5: Datos de dureza del agua

Caudal de agua a tratar (m³/h)	10
Dureza del agua a tratar (°dH)	27,8
Dureza del agua tratada (°dH)	<0,1
Horas de trabajo diarias	8

En la Ecuación 4 se calcula la capacidad que debe tener el descalcificador empleando los datos de la Tabla 5:

$$10 \frac{m^3}{h} \cdot 27,8 \text{ °dH} \cdot 8 h = 2224 m^3 \text{ °dH} \quad (4)$$

5.2.-CLORACIÓN

La cantidad de cloro que debe añadirse la determina el agua y depende de la concentración de

patógenos. Para calcular el cloro necesario para tratar el agua de pozo se ha realizado el siguiente procedimiento:

-Se llenan tres recipientes de un litro de capacidad con el agua a tratar.

-A continuación se añaden 0,1, 0,3 y 0,5 ml de cloro puro respectivamente a cada una de las botellas con la ayuda de una jeringa y se deja actuar al cloro durante 24 horas.

-Una vez transcurrido este periodo de tiempo, se utiliza un medidor de cloro libre, como el que se muestra en la Figura 5.1, para saber qué cantidad de cloro se ha consumido. Para ello, se llena el medidor, se añaden 6 gotas de reactivo (ortotolidina < 0,1%; ácido clorhídrico 3,1%) y se agita bien la mezcla. Cuando el líquido tiene un color amarillento uniforme se compara con la escala de colores del medidor para obtener la cantidad de cloro libre.

-En el caso del primer recipiente el color después de añadir el reactivo era transparente, lo que indica que no hay cloro libre y que todo se ha consumido. El segundo recipiente ha adoptado un color, después de añadir el reactivo, correspondiente a 0,2 mg/l. El tercer recipiente se ha teñido con un color naranja intenso, indicativo de que la cantidad de cloro añadida es excesiva.

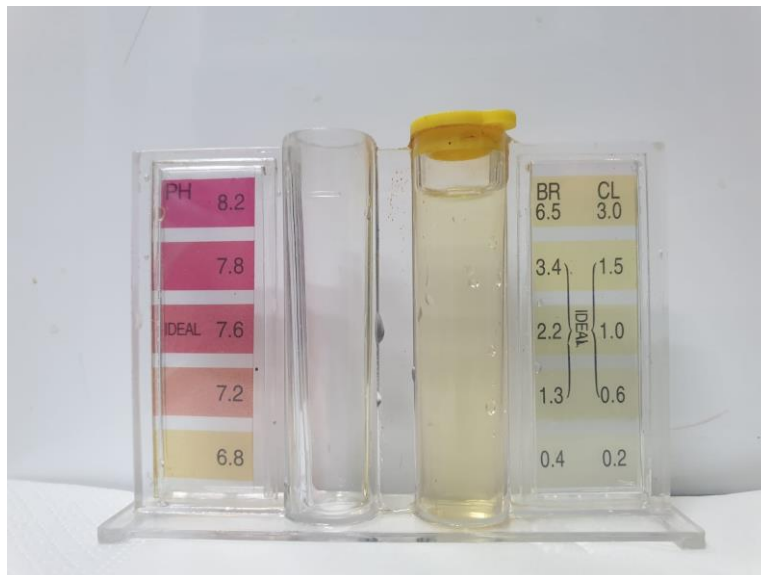


Figura 5.1: Medidor de cloro libre

De los resultados anteriores se concluye que hay que añadir al agua una cantidad de 0,3 ml de cloro por litro de agua a tratar para eliminar los microorganismos presentes y que, tras el proceso de cloración, quede una cantidad de cloro libre de 0,2 mg/l que es muy semejante al cloro residual presente en el otro tipo de agua analizada. Una dosis de 0,3 ml de cloro por litro de agua cumple con la recomendación del fabricante de membranas de trabajar ligeramente por encima de la cantidad necesaria para no poner en riesgo las membranas si queda algún patógeno. Si se añaden cantidades menores puede ocurrir que no se eliminen todos los microorganismos o que la cantidad de cloro libre sea excesivamente baja.

Multiplicando el caudal de agua a tratar por la concentración de cloro que se ha calculado, se obtiene el caudal que debe dosificar la bomba, como se muestra en la Ecuación 5:

$$10 \frac{m^3}{h} \cdot 0,3 \frac{l}{m^3} = 3 \frac{l}{h} \quad (5)$$

La bomba dosificadora deberá tener un margen de seguridad del 50 %, por lo que debe ser capaz de suministrar un caudal de 4,5 l/h de cloro.

El depósito de hipoclorito se diseña para una autonomía de 10 días de trabajo, con lo que, según la Ecuación 6, debe tener un volumen de:

$$3 \frac{l}{h} \cdot 8 \frac{h}{día} \cdot 10 \text{ días} = 240 l \quad (6)$$

5.3.-FILTRACIÓN

A la hora de diseñar el filtro multicapa de arena y carbón activo hay que centrarse en tres factores: caudal, velocidad de filtración y superficie filtrante.

Atendiendo las recomendaciones de los fabricantes de filtros de emplear una velocidad inferior a los 15 m/h, se diseña el filtro fijando una velocidad de 12 m/h, tal y como se expresa en la Ecuación 7:

$$S(m^2) = \frac{Q(\frac{m^3}{h})}{v(\frac{m}{h})} = \frac{10(\frac{m^3}{h})}{12(\frac{m}{h})} = 0,833 m^2 \quad (7)$$

La altura del lecho filtrante y el diámetro del mismo, así como la granulometría del lecho, se estiman siguiendo los estándares del fabricante, arrojando los siguientes resultados: 1,2 m de altura de lecho y 1,2 m de diámetro interno.

5.4.-ADICIÓN DE COMPUESTOS QUÍMICOS

El programa de fabricación de las membranas de ósmosis inversa proporciona los datos de dosificación de ácido para ajuste de pH, siendo la concentración de 14,9 ppm. La densidad del ácido sulfúrico es de 1.83 g/cm³. En la Ecuación 8, se calcula el caudal ácido sulfúrico que debe dosificar la bomba:

$$Q = 10 \frac{m^3}{h} \cdot 14,9 \frac{g}{m^3} \cdot \frac{1}{1,83} \frac{cm^3}{g} = 81,42 \frac{cm^3}{h} = 0,08142 \frac{l}{h} \quad (8)$$

Con el margen de seguridad del 50 %, la bomba debe ser capaz de suministrar un caudal de 0,122 l/h.

En cuanto al depósito, se diseña para una autonomía de 70 días de trabajo, por lo que su volumen debe ser el obtenido en la Ecuación 9:

$$0,08142 \frac{l}{h} \cdot 8 \frac{h}{día} \cdot 70 \text{ días} = 45,6 l \quad (9)$$

Para la dosificación de antiincrustante, el fabricante de membranas recomienda una dosis de entre 2 y 5 ppm, como el agua no es excesivamente dura se selecciona una dosis media de 3,5 ppm. Teniendo en cuenta que la densidad del antiincrustante es de 1,11 g/cm³, el caudal se calcula en la Ecuación 10:

$$Q = 10 \frac{m^3}{h} \cdot 3,5 \frac{g}{m^3} \cdot \frac{1}{1,11} \frac{cm^3}{g} = 31,53 \frac{cm^3}{h} = 0,03153 \frac{l}{h} \quad (10)$$

Dejando un margen de seguridad del 50%, la bomba debe ser capaz de suministrar un caudal de 0,0473 l/h.

El depósito se diseña con la misma autonomía que el de ácido sulfúrico, 180 días de trabajo, como se muestra en la Ecuación 11:

$$0,03153 \frac{l}{h} \cdot 8 \frac{h}{día} \cdot 180 \text{ días} = 45,4 l \quad (11)$$

5.5.-ÓSMOSIS INVERSA

El diseño de las membranas de ósmosis inversa se lleva a cabo con la ayuda de un software del fabricante de membranas elegido, Hydranautics [9]. Se emplean membranas de tipo ESPA (Energy

Saving Polyamide), que es el tipo más apropiado de membranas para tratar aguas de pozo. Estas membranas son de baja energía, con configuración espiral y trabajan a presión más baja, lo que se traduce en un ahorro energético.

El dimensionamiento de la unidad de ósmosis inversa se hace en función de un factor denominado caudal de permeado específico (l/m²/h), el cual depende de la calidad del agua que entra a la membrana. El fabricante establece unos límites de diseño para agua de pozo, entre 23,8 y 30,6 l/m²/h. El valor para el diseño de la unidad de ósmosis inversa es de 24,2 l/m²/h y la superficie de contacto de cada elemento es de 37,1 m².

Seleccionando un caudal de agua a obtener 9 (m³/h) y con los datos anteriores, en la Ecuación 12 se determina el número de elementos filtrantes:

$$\text{Número de elementos filtrantes} = \frac{9000 \frac{l}{h}}{37,1 m^2 \cdot 24,2 \frac{l}{m^2 \cdot h}} = 10 \text{ elementos} \quad (12)$$

Estos diez elementos se distribuyen como se ha explicado en la descripción, en cuatro vasos de presión, dos vasos de tres elementos y dos vasos de dos elementos.

5.6.-REMINERALIZACIÓN

Una vez tratada el agua y eliminados todos los elementos residuales, el perfil de sales del agua queda prácticamente a cero. De esta forma, solo será necesario añadir las cantidades de sales para ajustar el agua al perfil elegido y dejarla preparada para ser suministrada a la cervecería.

El tiempo de residencia del agua en el tanque agitado debe estar entre 10 y 20 minutos. En la Ecuación 13 se calcula el volumen que debe tener el tanque para un tiempo de residencia de 15 minutos:

$$V = 9000 \frac{l}{h} \cdot \frac{1}{4} h = 2250 l \quad (13)$$

El depósito se diseña con un margen de seguridad del 50%, por lo que debe tener una capacidad de 3375 l.

Para el ajuste de sales de de los dos posibles tipos de agua (Pilsen y Dortmund) se utiliza una calculadora online que permite obtener la cantidad de sales que hay que añadir en función del volumen de agua que se va a tratar y del perfil de agua elegido. Siguiendo las recomendaciones de la asociación de cerveceros artesanos española se ha utilizado una calculadora online [10].

Los perfiles de agua que se van a reproducir, como se ha indicado en el apartado anterior, son el agua de Pilsen y el agua de Dortmund:

-El perfil del agua de Pilsen, como puede apreciarse en la Tabla 6 es:

Tabla 6: Perfil del agua de Pilsen

Ciudad	Contenido en ppm del agua					
	Ca ²⁺	CO ₃ ²⁻	Cl ⁻	Mg ²⁺	Na ⁺	SO ₄ ²⁻
Pilsen	7	14	5	2	2	5

Introduciendo los datos en la calculadora (Figura 5.2) se obtienen las cantidades de sales que hay que añadir. 200 g de CaCO₃, 50 g de CaCl₂, 110 g de MgSO₄ y 50 g de NaCl. Debido a que el ajuste se va haciendo añadiendo y quitando sales, es muy difícil ajustar exactamente el perfil, además se

prioriza ajustar el ratio sulfatos/cloruros, por ello se utilizará este ajuste que es el que más se aproxima al exacto.

El agua de Pilsen contiene pocas sales disueltas, por lo que su ajuste es más sencillo y preciso y la cantidad de sales a añadir es muy reducida.

-El perfil del agua de Dortmund, como se observa en la Tabla 7 es:

Tabla 7: Perfil del agua de Dortmund

Ciudad	Contenido en ppm del agua					
	Ca ²⁺	CO ₃ ²⁻	Cl ⁻	Mg ²⁺	Na ⁺	SO ₄ ²⁻
Dortmund	225	221	60	40	60	120

Al introducir el perfil en la calculadora (Figura 5.3) y realizar el ajuste, se obtienen las cantidades a añadir en este segundo caso, priorizando el ratio sulfatos/cloruros y aproximando lo máximo posible. Cabe destacar que el ajuste se ha realizado para un volumen de 2250 l, un cuarto de los 9000 l que se tratan cada hora, ya que para este último volumen las cantidades de sales que hay que añadir son superiores a las máximas que puede procesar la calculadora. Por ello, para obtener las cantidades adecuadas hay que multiplicar por cuatro los valores mostrados por la calculadora: 3996 g de CaCO₃, 424 g de NaHCO₃, 1016 g de CaSO₄, 1000 g de CaCl₂, 1784 g de MgSO₄, 600 g de NaCl. En la Imagen 6.5 se muestra dicho ajuste.

El agua de Dortmund contiene una cantidad de iones mucho mayor que el agua de Pilsen, es por ello que el ajuste es mucho más complejo y la exactitud se reduce bastante. No obstante, aunque el nivel de los iones Ca²⁺ y CO₃²⁻ está bastante alejado del valor exacto, no se excede el límite permitido para el consumo, como indica la propia calculadora online y se muestra en la Figura 5.4.

Batch Data

1. Water Volume (total): Gallons Quarts Liters

2. Percent Dilution:
Dilute with distilled water to lower source ion concentrations.

3. Target Profile:

Water Chemistry - Ion Levels (ppm or mg/L)

	Ca ⁺²	Mg ⁺²	SO ₄ ⁻²	Na ⁺	Cl ⁻	HCO ₃ ⁻	Alkalinity
4. Source Minerals:	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	0
4a. Diluted Levels:	0	0	0	0	0	0	0
5. Target Minerals:	<input type="text" value="7"/>	<input type="text" value="2"/>	<input type="text" value="5"/>	<input type="text" value="2"/>	<input type="text" value="5"/>	<input type="text" value="14"/>	11
6. Adjustments From Salts:	6	1	5	2	6	14	11
7. Adjusted Water:	6	1	5	2	6	14	11
8. Difference:	-1	-1	0	0	+1	0	0

Brewing Salt Additions

Chalk CaCO ₃	<input type="text" value="200"/> grams	add 52.63 tsp
Baking Soda NaHCO ₃	<input type="text" value="0"/> grams	
Gypsum CaSO ₄	<input type="text" value="0"/> grams	
Calcium Chloride CaCl ₂	<input type="text" value="50"/> grams	add 14.71 tsp
Epsom Salt MgSO ₄	<input type="text" value="110"/> grams	add 24.44 tsp
Canning Salt NaCl	<input type="text" value="50"/> grams	add 8.33 tsp

Figura 5.2: Ajuste agua Pilsen

Batch Data

1. Water Volume (total): Gallons Quarts Liters

2. Percent Dilution:
Dilute with distilled water to lower source ion concentrations.

3. Target Profile:

Water Chemistry - Ion Levels (ppm or mg/L)

	Ca ⁺²	Mg ⁺²	SO ₄ ⁻²	Na ⁺	Cl ⁻	HCO ₃ ⁻	Alkalinity
4. Source Minerals:	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	0
4a. Diluted Levels:	0	0	0	0	0	0	0
5. Target Minerals:	<input type="text" value="225"/>	<input type="text" value="40"/>	<input type="text" value="120"/>	<input type="text" value="60"/>	<input type="text" value="60"/>	<input type="text" value="221"/>	181
6. Adjustments From Salts:	145	20	140	40	94	304	249
7. Adjusted Water:	145	20	140	40	94	304	249
8. Difference:	-80	-20	+20	-20	+34	+83	68

Brewing Salt Additions

Chalk CaCO ₃	<input type="text" value="999"/> grams	add 262.89 tsp
Baking Soda NaHCO ₃	<input type="text" value="106"/> grams	add 24.09 tsp
Gypsum CaSO ₄	<input type="text" value="254"/> grams	add 63.50 tsp
Calcium Chloride CaCl ₂	<input type="text" value="250"/> grams	add 73.53 tsp
Epsom Salt MgSO ₄	<input type="text" value="446"/> grams	add 99.11 tsp
Canning Salt NaCl	<input type="text" value="150"/> grams	add 25.00 tsp

Figura 5.3: Ajuste agua Dortmund

Ion Levels (based on <i>Adjusted Water</i> above)							
	Ca ⁺²	Mg ⁺²	SO ₄ ⁻²	Na ⁺	Cl ⁻		
9. Ion Level Report:	★	★	★	★	★		
Ion Balance for Flavor, Color and pH (based on <i>Adjusted Water</i> above)							
Sulphate : Chloride ratio	bitter						
Alkalinity and SRM	good for dark beer (150-300 ppm Alkalinity)						

Notes About the Ion Level Report:

- ★ Within recommended generalized brewing range.
- ▼ Low, but not necessarily an issue.
- ▲ Above recommended brewing range, but not harmful.
- ! Harmful, do not brew at this level!
- A low or high ion concentration is not necessarily a bad thing, such as the case of Pilsen water, where the target is practically diluted water, or the case of Burton on Trent where the sulfates are elevated.
- If the calculator reports a harmful level, this means it is definitely harmful to the flavor of the beer, and quite possibly harmful to human health!

Figura 5.4: Informe de nivel de iones

Una vez ajustados los perfiles de los dos tipos de agua, se procede al diseño de las tolvas dosificadoras. Se diseñan para el caso más desfavorable, es decir, el que requiera una mayor adición de sales, el perfil de Dortmund:

-Tolva dosificadora de carbonato de calcio. Teniendo en cuenta que el caudal de agua que se ha tratado es de 9000 l/h y que la cantidad de esta sal que hay que añadir es de 1000 g/h, para que la autonomía de la tolva sea de 2 días de trabajo debe tener un volumen similar al calculado en la Ecuación 14:

$$2 \text{ días} \cdot 8 \frac{\text{h}}{\text{día}} \cdot 3996 \frac{\text{g}}{\text{h}} \cdot \frac{0,001 \text{ l}}{2,71 \text{ g}} = 23,6 \text{ l} \quad (14)$$

-Tolva dosificadora de bicarbonato de sodio para 7 días de trabajo de autonomía (Ecuación 15):

$$7 \text{ días} \cdot 8 \frac{\text{h}}{\text{día}} \cdot 424 \frac{\text{g}}{\text{h}} \cdot \frac{0,001 \text{ l}}{2,2 \text{ g}} = 10,8 \text{ l} \quad (15)$$

-Tolva dosificadora de sulfato de calcio para 4 días de trabajo de autonomía (Ecuación 16):

$$4 \text{ días} \cdot 8 \frac{\text{h}}{\text{día}} \cdot 1016 \frac{\text{g}}{\text{h}} \cdot \frac{0,001 \text{ l}}{2,32 \text{ g}} = 14,01 \text{ l} \quad (16)$$

-Tolva dosificadora de cloruro de calcio para 4 días de trabajo de autonomía (Ecuación 17):

$$4 \text{ días} \cdot 8 \frac{\text{h}}{\text{día}} \cdot 1000 \frac{\text{g}}{\text{h}} \cdot \frac{0,001 \text{ l}}{2,15 \text{ g}} = 14,88 \text{ l} \quad (17)$$

-Tolva dosificadora de sulfato de magnesio para 7 días de trabajo de autonomía (Ecuación 18):

$$2 \text{ días} \cdot 8 \frac{\text{h}}{\text{día}} \cdot 1784 \frac{\text{g}}{\text{h}} \cdot \frac{0,001 \text{ l}}{2,66 \text{ g}} = 10,73 \text{ l} \quad (18)$$

-Tolva dosificadora de cloruro de sodio para 6 días de trabajo de autonomía (Ecuación 19):

$$6 \text{ días} \cdot 8 \frac{\text{h}}{\text{día}} \cdot 600 \frac{\text{g}}{\text{h}} \cdot \frac{0,001 \text{ l}}{2,16 \text{ g}} = 15,56 \text{ l} \quad (19)$$

6 DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL

En el siguiente apartado se detallan los diferentes sistemas y equipos de control presentes en la planta, los cuales están representados en la Figura 4.2, así como las interacciones entre las diferentes partes de la planta. Se realiza una descripción de cada instrumento y de la actividad que realiza.

6.1.-DESCALCIFICACIÓN

El primer instrumento de la zona de descalcificación es un indicador de presión PI-1, el cual sirve para asegurar que la presión que suministra la bomba B-1 es la adecuada para entrar en el descalcificador. Se trata de un transductor que cuenta con dos extensómetros cableados y unidos a un diafragma. Cuando el agua deforma el diafragma los extensómetros lo detectan y producen un cambio en la resistencia eléctrica proporcional a la presión, con lo que se consigue que ésta se muestre en la pantalla del equipo.

En caso de que no sea posible que el agua llegue al descalcificador (avería, mantenimiento, presión inadecuada,...) se cuenta con un by-pass controlado por una válvula de asiento (V-4) que actúa como sistema de control de seguridad.

Una vez realizada la descalcificación, la unidad cuenta con un medidor de dureza I-1 que se coloca en la tubería de salida del descalcificador. Este equipo es un analizador para el monitoreo en continuo del contenido total de sales de calcio y magnesio en agua. Permite controlar, por un lado, que la descalcificación ha sido efectiva y el agua tiene la dureza adecuada y, por otro lado, la necesidad de regenerar la resina, ya que cuando la dureza sobrepasa un nivel determinado se está poniendo de manifiesto la necesidad de regeneración.

6.2.-CLORACIÓN

Cuando el agua llega a la zona de cloración, un medidor de caudal FI-1 en la tubería principal, capaz de emitir una señal que será recibida por la bomba dosificadora B-6 del depósito de hipoclorito sódico, se encarga de controlar la dosis de cloro que hay que añadir. Es un medidor de flujo de agua electromagnético con salida analógica.

Al igual que en la descalcificación, la unidad cuenta con un sistema de by-pass con accionado por

una válvula de asiento (V-12) como medida de seguridad en caso de que no se puede atravesar la canalización principal.

6.3.-FILTRACIÓN

A la entrada del filtro se ha instalado un indicador de presión PI-2 que será el encargado de detectar la pérdida de carga que provoca la acumulación de sólidos en el filtro. Cuando se supera un determinado valor de presión es necesario lavar el filtro para eliminar las partículas retenidas y asegurar unas condiciones de trabajo óptimas para el filtro.

Nuevamente, un by-pass con válvula de asiento (V-14) actúa como sistema de seguridad para poder eludir el paso por el filtro en caso de necesidad.

6.4.- SISTEMAS DE CONTROL PREVIOS A LA UNIDAD DE ÓSMOSIS INVERSA

La ósmosis inversa es la zona más delicada de la planta, por lo que el control previo a estos sistemas es fundamental.

En esta zona hay un ramal de toma de muestras equipado con tres medidores que registran los valores de potencial de oxidación-reducción (OI-1), pH (GI-1) y conductividad (CI-1):

-El medidor de potencial de oxidación-reducción cuenta con un electrodo de un metal precioso, para que no reaccione con el medio, capaz de intercambiar electrones con el agua. Dicho intercambio provoca una tensión eléctrica que se mide y se expresa en mV en la pantalla del medidor.

-El medidor de pH consta de un electrodo de vidrio capaz de medir la concentración del ión de hidrógeno y un electrodo de referencia de plata. La diferencia de potencial entre ambos electrodos permite conocer el pH, el cual se muestra en la pantalla del medidor.

-El medidor de conductividad es un sistema amperimétrico capaz de medir la corriente en el agua. Cuanto mayor sea la intensidad, mayor será la conductividad que muestre el medidor de conductividad por pantalla.

Tras estos equipos, un medidor de turbidez (I-2) se encarga de medir la turbidez del agua y mandar este valor a un controlador (C-1) que se asegura de que el parámetro se encuentra dentro de los límites recomendados. Si esto no es así, el controlador envía una señal a la bomba de alimentación de agua de red (B-4) o a la bomba que impulsa el agua de pozo hacia el filtro (B-2 o B-3), según la que se esté tratando, para regular el flujo de agua y que mejoren los valores de turbidez hasta estar dentro de los límites establecidos. El turbidímetro es un instrumento que mide la intensidad de la luz dispersada 90 grados cuando un rayo de luz pasa a través de una muestra de agua. La turbidez se expresa en pantalla en NTU.

6.5.-ÓSMOSIS INVERSA

La unidad de ósmosis inversa es la que cuenta con mayor número de elementos de control, ya que es la más sensible de todas.

En primer lugar, dos indicadores de presión (PI-3 e PI-4) antes y después de los filtros de cartucho reflejan la presión con la que el agua entra al sistema de ósmosis inversa y la pérdida de carga indicativa de la necesidad de un cambio de filtros, respectivamente.

A continuación, las electroválvulas V-34 y V-35, junto con el presostato PS-1 y el indicador de presión PI-5 se encargan de asegurar la unidad y evitar que se superen valores límite que podrían dañar las membranas. Las electroválvulas son válvulas electromagnéticas todo o nada que se activan por una bobina solenoide cuando el presostato manda una señal al superarse una

determinada presión.

También se cuenta con un indicador de temperatura (TI-1), el cuál es bimetálico y cuenta con dos chapas de metal que se deforman de manera proporcional a los cambios de temperatura. La temperatura se muestra en la pantalla digital del medidor.

Antes de entrar en los vasos de presión, los indicadores de presión PI-5, PI-6 y PI-7 ayudan a ajustar la presión de bombeo del agua hacia las membranas ejercida por la bomba B-9.

Después de los vasos de presión, los indicadores de caudal FI-2 e FI-3 registran disminuciones del flujo de agua que sale de las membranas, indicadores de necesidad de limpieza de las mismas. El indicador de caudal FI-4 indica el caudal que se recircula.

En el sistema de limpieza se encuentran los indicadores de nivel LI-1 e LI-2, que sirven para saber cuándo hay que llenar el depósito de agua y cuándo está completamente lleno. Estos indicadores cuentan con sensores que detectan el nivel del líquido en el depósito y son capaces de emitir una señal luminosa cuando el agua llega a la altura a la que están colocados.

Por último, y al igual que ocurre antes de entrar a esta unidad, existe una toma de muestras con indicadores de potencial de oxidación-reducción (OI-2), de pH (GI-2) y de conductividad (CI-2). También cuenta con by-pass de seguridad accionado por una válvula de asiento (V-29) y una bomba centrífuga (B-5) que suministra la presión adecuada al agua en caso de no atravesar la unidad de ósmosis.

6.6.-REMINERALIZACIÓN

Los sistemas de control presentes en esta zona de la planta están orientados a conseguir un buen ajuste del perfil de agua.

En la entrada del agitador, el indicador de caudal FI-5 manda una señal a las tolvas dosificadoras de sales para ajustar la cantidad que hay que añadir.

El agitador cuenta con un controlador de temperatura (TC-1) que manda una señal al sistema de calentamiento del agitador para mantener el agua a la temperatura adecuada para que la disolución de las sales sea óptima.

Un sistema de by-pass con una válvula de asiento (V-52) permite evitar la remineralización del agua si se desea.

El último sistema de control de la planta son los medidores de potencial de oxidación-reducción OI-3, de pH GI-3 y de conductividad CI-3, presentes en el ramal de la toma de muestras previo a la cervecería. Estos dispositivos sirven para cerciorarse de que el agua que va a entrar a la cervecería tiene el perfil deseado.

7 ESPECIFICACIONES TÉCNICAS

En el presente apartado se recogen las hojas de especificaciones técnicas de los principales equipos que conforman la planta de tratamiento de agua. En ellas se detallan aspectos como el material de fabricación, el tamaño, el caudal o la presión de operación.

7.1.- BOMBA DE AGUA DE POZO

En la Tabla 8 se recogen las especificaciones técnicas de la bomba B-1 [11]. La Figura 7.1 es una imagen de dicha bomba.

Tabla 8: Especificaciones técnicas bomba B-1

TABLA DE ESPECIFICACIONES BOMBA CENTRÍFUGA VERTICAL	
DATOS GENERALES	
Denominación del equipo	B-1
Modelo	PS7V 300/6
Función	Extracción del agua de pozo
DATOS DE OPERACIÓN	
Fluido	Agua
Presión de operación	máximo 8 bar
Temperatura de operación	5°C - 35 °C
Conexión eléctrica	230 V-50 Hz
DATOS DE DISEÑO	
Material	Acero inoxidable
Caudal	15 m ³ /h
Altura de impulsión	74,8 m.c.a.
Potencia	1,85 kW



Figura 7.1: Bomba B-1

7.2.- DESCALCIFICACIÓN

-Descalcificador. Las especificaciones técnicas del descalcificador se encuentran en la Tabla 9 [12] y en la Figura 7.2 se muestra una imagen del mismo.

Tabla 9: Especificaciones técnicas descalcificador

TABLA DE ESPECIFICACIONES DESCALCIFICADOR	
DATOS GENERALES	
Denominación del equipo	D-1, D-2
Modelo	CLACK WS 2H
Función	Descalcificación del agua de pozo
DATOS DE OPERACIÓN	
Fluido	Agua
Presión de operación	3 bar- 5,5 bar
Temperatura de operación	4°C - 43 °C
Válvula de control	Válvula electrónica programable
Conexión de agua	2" hembra BSPT
Depósito de sal	750 l
Resina	Monosfera de alta capacidad
Conexión eléctrica	220V - 12V AC
DATOS DE DISEÑO	
Material	Poliéster reforzado con fibra de vidrio y polietileno
Caudal	28,4 m ³ /h
Capacidad	3200 x 2 (HF x m ³)
Potencia	1,85 kW
Consumo de sal	100 x 2 kg
Volumen de resina	500 x 2 l



Figura 7.2: Descalcificador dúplex

-Medidor de dureza. Las especificaciones técnicas de este equipo se muestran en la Tabla 10 [13]. La Figura 7.3 muestra el medidor.

Tabla 10: Especificaciones técnicas medidor de dureza

TABLA DE ESPECIFICACIONES MEDIDOR DE DUREZA	
DATOS GENERALES	
Denominación del equipo	I-2
Modelo	HACH SP 510
Función	Medida de dureza del agua descalcificada
DATOS DE OPERACIÓN	
Fluido	Agua
Rango de medición	0,025 – 25 °dH
Presión de operación	0,1 bar- 10 bar
Temperatura de operación	5°C - 40 °C
Salidas	RS485 4 a 20 mA aislados
Alimentación eléctrica	110/220 V CA, 50/60 Hz, 12 Vcc
DATOS DE DISEÑO	
Consumo de energía	100 W
Medidas	300 x 400 x 150 mm
Peso	20 kg



Figura 7.3: Medidor de dureza de agua

7.3.- CLORACIÓN

-Medidor de caudal. La Tabla 11 contiene las especificaciones del medidor de caudal [14] y su imagen se muestra en la Figura 7.4.

Tabla 11: Especificaciones técnicas medidor de caudal

TABLA DE ESPECIFICACIONES MEDIDOR DE CAUDAL	
DATOS GENERALES	
Denominación del equipo	I-3
Modelo	Rs485
Función	Medida de caudal
DATOS DE OPERACIÓN	
Fluido	Agua
Rango de medición	1500:1 Tasa de flujo <m/s hasta 15m/s
Presión de operación	1 bar - 40 bar
Temperatura de operación	(-20°C) – (70 °C)
Salidas	0-10mA/4-20mA
Alimentación eléctrica	AC220V 50Hz /DC24V/3,6V
DATOS DE DISEÑO	
Material	Acero inoxidable
Consumo de energía	15 W
Diámetro de conexión	2" -DN50
Peso	14 kg



Figura 7.4: Medidor de caudal de agua

-Bomba dosificadora de hipoclorito sódico. En la Tabla 12 se incluyen las especificaciones técnicas de la bomba [15]. La Figura 7.5 refleja dicha bomba.

Tabla 12: Especificaciones técnicas bomba dosificadora hipoclorito sódico

HOJA DE ESPECIFICACIONES BOMBA DOSIFICADORA HIPOCLORITO SÓDICO	
DATOS GENERALES	
Denominación del equipo	B-6
Modelo	PD046-728NI
Función	Dosificación hipoclorito sódico
DATOS DE OPERACIÓN	
Caudal máximo	7,6 l/h
Presión	3,4 – 30,6 bar
Carrera máxima	160 SPM
Alimentación eléctrica	115-230 V / 50-60 Hz
Precisión	+/- 3%



Figura 7.5: Bomba dosificadora hipoclorito sódico

-Depósito de hipoclorito sódico. En la Tabla 13 se muestran las especificaciones [16] y en la Figura 7.6 una imagen del depósito.

Tabla 13: Especificaciones técnicas depósito hipoclorito sódico

HOJA DE ESPECIFICACIONES DEPÓSITO HIPOCLORITO SÓDICO	
DATOS GENERALES	
Denominación del equipo	DP-1
Modelo	Astralpool 01315
Función	Almacenamiento hipoclorito sódico
DATOS DE DISEÑO	
Capacidad	250 l
Material	Polietileno
Autonomía	10 días
Horas de aplicación	8 h/día
Color	Blanco



Figura 7.6: Depósito hipoclorito sódico

-Mezclador estático. Las especificaciones técnicas del equipo se recogen en la Tabla 14 [17] y una imagen en la Figura 7.7.

Tabla 14: Especificaciones técnicas mezclador estático

TABLA DE ESPECIFICACIONES MEZCLADOR	
DATOS GENERALES	
Denominación del equipo	M-1
Modelo	SRH-3-140
Función	Homogeneización de la mezcla agua-hipoclorito
DATOS DE OPERACIÓN	
Fluido	Agua
Caudal	0-18 m ³ /h
Alimentación eléctrica	110-480 V
DATOS DE DISEÑO	
Material	Acero inoxidable
Consumo de energía	15 W
Velocidad del motor	2900 r.p.m.
Diámetro de conexión	2" – DN50
Peso	100 kg

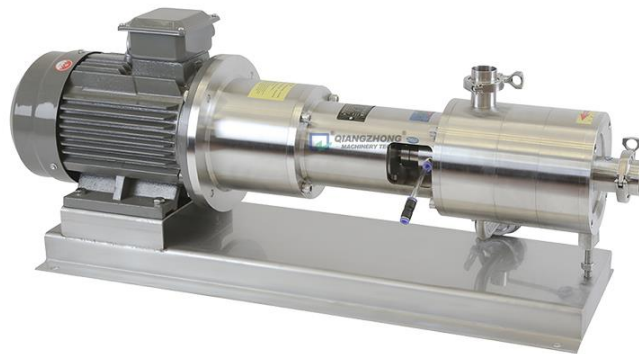


Figura 7.7: mezclador estático

7.4.-FILTRACIÓN

-En la Tabla 15 se recogen las especificaciones técnicas del filtro arena y carbón activo [18]. Así mismo en la Figura 7.8 se muestra una imagen del equipo.

Tabla 15: Especificaciones técnicas filtro arena y carbón activo

HOJA DE ESPECIFICACIONES FILTRO ARENA Y CARBÓN ACTIVO	
DATOS GENERALES	
Denominación del equipo	F-1
Modelo	YL-ACF-1400
Función	Retención de partículas del agua
DATOS DE OPERACIÓN	
Capacidad	0 - 100 m ³ /h
Tasa de filtración	5 – 12 m/h
Material Filtrante	Arena y Carbón Activo
Presión de operación	0,5 - 6 bar
Temperatura de operación	5 - 40 °C
Alimentación eléctrica	220/240V 380V 50Hz
DATOS DE DISEÑO	
Material	Acero inoxidable
Diámetro de filtro	1400 mm
Altura total	2800 mm
Entrada/salida de agua	DN65



Figura 7.8: Filtro a presión de arena y carbón activo

-Las bombas B-2, B-3 y B-4, que suministran la presión necesaria para entrar al filtro a la corriente de cloración, de by-pass de cloración y de agua de red respectivamente, son similares a la bomba B-1 de suministro de agua de pozo, cuya hoja de especificaciones se adjunta en la Tabla 8.

7.5.- ADICIÓN DE COMPUESTOS QUÍMICOS

-Bombas dosificadoras de ácido sulfúrico y antiincrustante. Las bombas empleadas para estos suministros (B-7 y B-8) son similares a la bomba dosificadora de hipoclorito sódico B-6, cuyas especificaciones técnicas están recogidas en la Tabla 13.

-Depósitos de ácido sulfúrico y antiincrustante. Las especificaciones técnicas se incluyen en la Tabla 16 [19]. Se muestra una imagen en la Figura 7.9.

Tabla 16: Especificaciones técnicas depósitos antiincrustante y ácido sulfúrico

HOJA DE ESPECIFICACIONES DEPÓSITO ANTIINCRUSTANTE/ÁCIDO SULFURICO	
DATOS GENERALES	
Denominación del equipo	DP-2, DP-3
Modelo	Astralpool 57613
Función	Almacenamiento de ácido y antiincrustante
DATOS DE DISEÑO	
Capacidad	50 l
Material	Polietileno
Autonomía	70 días (antiincrustante) y 180 días (ácido sulfúrico)
Horas de aplicación	8 h/día
Color	Blanco



Figura 7.9: Depósito de antiincrustante/ácido sulfúrico

-Mezclador estático. El mezclador M-2 es similar al mezclador de hipoclorito sódico M-1. En la Tabla 12 aparecen las especificaciones técnicas de dicho equipo.

-Bomba de bay-pass. La bomba de la línea de by-pass B-5 es similar a la bomba B-1 de suministro de agua de pozo. En la Tabla 8 se encuentran sus especificaciones técnicas.

-Medidor de turbidez. Sus especificaciones técnicas se encuentran en la Tabla 17 [20] y en la Figura 7.10 se representa el medidor.

Tabla 17: Especificaciones técnicas medidor de turbidez

HOJA DE ESPECIFICACIONES MEDIDOR DE TURBIDEZ	
DATOS GENERALES	
Denominación del equipo	I-8
Modelo	TUC 3
Función	Medición de la turbidez del agua
DATOS DE OPERACIÓN	
Temperatura de operación	1 – 50 °C
Alimentación eléctrica	120 – 240 V AC, 47 – 63 Hz, 80 VA
DATOS DE DISEÑO	
Caudal	6 – 60 l/h
Precisión	0 – 1000 NTU
Resolución	0,0001 NTU por debajo de 10 NTU
Pantalla	Pantalla LCD con iluminación de fondo
Protección	IP66



Tabla 7.10: Medidor de turbidez

7.6.-ÓSMOSIS INVERSA

-Filtros de cartucho. Las especificaciones técnicas de estos filtros se incluyen en la Tabla 18 [21]. Del mismo modo se muestra una imagen en la Figura 7.11.

Tabla 18: Especificaciones técnicas filtros de cartucho

HOJA DE ESPECIFICACIONES FILTROS DE CARTUCHO	
DATOS GENERALES	
Denominación del equipo	F-2, F-3
Modelo	Astralpool Terra 100
Función	Filtración de agua
DATOS DE DISEÑO	
Caudal	16,5 m ³ /h
Salida	2" DN50
Presión	2,5 bar
Área filtrante	9,3 m ²



Figura 7.11: Filtro de cartucho

-Bomba de presión anterior a los vasos de presión. La bomba B-9 tiene las mismas características que la bomba B-1 de extracción de agua de pozo, cuyas características se reflejan en la Tabla 8.

-Vasos de presión. Las especificaciones técnicas se recogen en la Tabla 19 [22]. La Figura 7.12 muestra una imagen.

Tabla 19: Especificaciones técnicas vasos de presión

HOJA DE ESPECIFICACIONES VASOS DE PRESIÓN	
DATOS GENERALES	
Denominación del equipo	VP-1, VP-2, VP-3, VP-4
Modelo	Hydranautics ESPA
Función	Eliminación de sales del agua
DATOS DE OPERACIÓN	
Presión de operación aproximada	11 bar
Recuperación total del sistema	75%
Recuperación	70,8%
Recirculación concentrado	0,8 m ³ /h
Presión de entrada	3 – 6 bar
Incremento del paso de sales	10%/año
Duración de las membranas	3 años
Disminución de flujo	7%/año
Factor de ensuciamiento	0,8
Alimentación eléctrica	400V / 50 Hz
DATOS DE DISEÑO	
Flujo de permeado (20 °C aprox.)	10 m ³ /h
Área de contacto de membrana	37,1 m ²
Flujo medio	24,2 l/m ² ·h
Potencia	7,5 kW
Conexiones (entrada, permeado, concentrado)	DN65, DN40, DN32



Figura 7.12: Vaso de presión

-Depósito de agua para lavado de membranas. Las especificaciones de este equipo se encuentran en la Tabla 20 [23] y en la Figura 7.13 se representa el equipo.

Tabla 20: Especificaciones técnicas depósito agua de lavado

HOJA DE ESPECIFICACIONES DEPÓSITO AGUA DE LAVADO	
DATOS GENERALES	
Denominación del equipo	DP-4
Modelo	Astralpool 28831
Función	Almacenamiento de agua
DATOS DE DISEÑO	
Capacidad	1000 l
Material	Polietileno
Color	Blanco



Figura 7.13: Depósito de agua de lavado

-Bomba centrífuga horizontal. La Tabla 21 muestra las especificaciones técnicas de la bomba [24] y la Figura 7.14 incluye una imagen de la misma.

Tabla 21: Especificaciones técnicas bomba centrífuga horizontal

TABLA DE ESPECIFICACIONES BOMBA CENTRÍFUGA HORIZONTAL		
DATOS GENERALES		
Denominación del equipo	B-10	
Modelo	CBT 1500	
Función	Impulsión del agua de lavado	
DATOS DE OPERACIÓN		
Fluido	Agua	
Temperatura de trabajo	0 – 90 °C	
Conexión eléctrica	230/400 V 20,4 A	
DATOS DE DISEÑO		
Material	Cuerpo	Fundición
	Turbina	Latón
	Eje	Acero inoxidable
	Soporte motor	Fundición
	Cierre mecánico	Grafito
Caudal	18 m ³ /h	
Altura de impulsión	89 m.c.a.	
Potencia	11 kW	
Conexiones entrada/salida	2"/1 ^{1/4} "	



Figura 7.14: Bomba centrífuga horizontal

7.7.- REMINERALIZACIÓN

-Medidor de caudal. El medidor de caudal I-25 es similar al medidor de caudal I-3, cuyas propiedades se encuentran en la Tabla 11.

-Tanque agitador. Sus especificaciones están recogidas en la Tabla 22 [25] y su imagen en la Figura 7.15.

Tabla 22: Especificaciones técnicas tanque agitador

TABLA DE ESPECIFICACIONES TANQUE AGITADOR	
DATOS GENERALES	
Denominación del equipo	A-1
Marca	Ucan
Función	Agitación y calefacción de agua
DATOS DE OPERACIÓN	
Fluido	Agua
Conexión eléctrica	110 V/220 V/380 V/440 V
DATOS DE DISEÑO	
Material	Acero inoxidable
Capacidad	2500 l
Potencia	4 kW
Peso	480 kg
Dimensiones (L, W, H)	1,3 m / 1,3 m / 1,5m



Figura 7.15: Tanque agitador

-Tolvas dosificadoras. En las Tablas 23, 24 y 25 se encuentran las especificaciones técnicas [26], [27]. Del mismo modo, en las Figuras 7.16 y 7.17 se incluyen sus imágenes.

Tabla 23: Especificaciones técnicas tolva dosificadora T-1

TABLA DE ESPECIFICACIONES TOLVAS DOSIFICADORAS	
DATOS GENERALES	
Denominación del equipo	T-1
Modelo	HF-SF-1
Función	Dosificación de sales minerales
DATOS DE OPERACIÓN	
Conexión eléctrica	220/380 V CA, 50Hz
DATOS DE DISEÑO	
Material	Acero inoxidable
Dosificación	2 – 10 kg/h
Capacidad	30 l
Potencia	0,75 kW
Dimensiones (L, W, H)	1m / 0,7 m / 0,8 m



Figura 7.16: Tolva dosificadora T-1

Tabla 24: Especificaciones técnicas tolva dosificadora T-2

TABLA DE ESPECIFICACIONES TOLVAS DOSIFICADORAS	
DATOS GENERALES	
Denominación del equipo	T-2
Modelo	DosiTec AI-15
Función	Dosificación de sales minerales
DATOS DE OPERACIÓN	
Velocidad del motor	1450 r.p.m.
Conexión eléctrica	220 V CA, 50Hz
DATOS DE DISEÑO	
Material	Acero inoxidable
Dosificación	200 – 800 g/h
Capacidad	15 l
Potencia	0,5 CV
Peso	40 kg
Dimensiones (L, W, H)	1,025 m / 0,225 m / 0,73 m

Tabla 25: Especificaciones técnicas tolvas dosificadoras T-3, T-4, T-5 y T-6

TABLA DE ESPECIFICACIONES TOLVAS DOSIFICADORAS	
DATOS GENERALES	
Denominación del equipo	T-3, T-4, T-5, T-6
Modelo	DosiTec AI-20
Función	Dosificación de sales minerales
DATOS DE OPERACIÓN	
Velocidad del motor	1450 r.p.m.
Conexión eléctrica	220 V CA, 50Hz
DATOS DE DISEÑO	
Material	Acero inoxidable
Dosificación	600 – 3000 g/h
Capacidad	15 l
Potencia	0,5 CV
Peso	40 kg
Dimensiones (L, W, H)	1,025 m / 0,225 m / 0,73 m



Figura 7.17: Tolva dosificadora (T-2 a T-6)

7.8.-INSTRUMENTACIÓN

-En la Tabla 26 se recoge la instrumentación de la planta.

Tabla 26: Instrumentación de la planta

TABLA DE INSTRUMENTACIÓN	
Cantidad	Equipo
40	Válvula de asiento
1	Válvula de retención
7	Indicadores de presión
5	Medidores de caudal
1	Controlador de turbidez
5	Válvulas de obturación de tres vías
3	Medidores de potencial de oxidación-reducción
3	Medidores de pH
3	Medidores de conductividad
3	Electroválvulas
1	Presostato
1	Indicador de temperatura
1	Controlador de temperatura
8	Válvulas de compuerta
2	Indicadores de nivel

8 ESTIMACIÓN ECONÓMICA

Una vez diseñada la planta, se procede a realizar una estimación económica para estudiar la viabilidad de la planta. Por un lado, se estudiarán los costes de inversión necesarios para la instalación de la planta y, por otro, se estudiarán los costes de operación derivados del funcionamiento de la planta.

8.1.-COSTES DE INVERSIÓN

Los costes de inversión están compuestos por los costes de cada uno de los equipos que forman la planta junto con el coste de instalación de los mismos.

-Costes de equipos. En la Tabla 27 se recogen los precios de los equipos de la planta.

-Costes de instalación. En la Tabla 28 se reflejan los costes de instalación, tanto hidráulica como eléctrica, de los equipos que componen la planta.

8.2.- COSTES DE REPOSICIÓN

-Resinas de intercambio. Con un correcto mantenimiento y funcionamiento del descalcificador, el fabricante recomienda un cambio de membranas cada 6-8 años, con un coste aproximado de 1.110 €. Anualizado, supone un coste de 159 €/año.

-Cartuchos. Los filtros empiezan a perder eficacia a partir de los 3 años, por lo que se recomienda su cambio con dicha frecuencia por un valor de 140 € (los dos filtros). Lo que supone 47 €/año.

-Membranas. El fabricante de membranas Hydranautics recomienda un cambio de membranas cada 6-5 años, con un coste de 30-50 €/m². Para anualizarlo se calcula el coste de reposición de un 15% del área total, como se muestra en la Ecuación 20:

$$\text{Coste} = 10 \cdot 37,1\text{m}^2 \cdot 0,15 \text{ año}^{-1} \cdot 40 \frac{\text{€}}{\text{m}^2} = 2.226 \frac{\text{€}}{\text{año}} \quad (20)$$

Tabla 27: Costes de equipos

Equipos	Cantidad	Coste unitario (€)	Coste total (€)
Bomba centrífuga vertical	6	526	3158
Descalcificador dúplex	1	16950	16950
Medidor de dureza	1	1.155	1.155
Medidor de caudal	2	351	702
Mezclador	2	2.495	4.991
Filtro	1	9.242	9.242
Bomba dosificadora	3	254	762
Depósito 250 l	1	106	106
Depósito 50 l	2	50	100
Medidor de turbidez	1	425	425
Filtros de cartucho	2	647	1.294
Vasos de presión	4	3.928	15.712
Depósito 1000 l	1	323	323
Bomba centrífuga horizontal	1	1.025	1.025
Tanque agitador	1	2.957	2.957
Tolva dosificadora	1	906	906
Tolva dosificadora	4	847	3.388
Tolva dosificadora	1	760	760
Sistema de control	1	30.000	30.000
Coste total (€)		93.956	

Tabla 28: Costes de instalación

Instalación	Coste (€)
Instalación e interconexión de equipos	59.000
Tuberías, válvulas y accesorios	46.000
Instrumentación y control	25.000
Puesta en marcha	15.000
Total	145.000

8.3.- COSTES DE EXPLOTACIÓN

-El correcto funcionamiento de la planta conlleva unos costes de operación y mantenimiento anuales, los cuales quedan recogidos en la Tabla 29:

Tabla 29: Costes de explotación

Operación	Consumo	Coste unitario (€ ₂₀₂₀)	Coste anual (€)
Efluente de agua	200 m ³ /año	0,72 €/m ³	144
Sal descalcificador	185 kg/día	0,45 €/kg	416
Antiincrustate	0,035 kg/h	0,18 €/kg	0,252
Energía	0,67 kWh/m ³	0,18 €/ kWh	48
Arena de sílice	180 kg/año	0,20 €/kg	36
Carbón activo	110 kg/año	0,7 €/kg	77
Hipoclorito de Sodio	3,33 kg/h	1,12 €/kg	75
Ácido sulfúrico	0,140 kg/h	0,45 €/kg	3
CO ₂	14 kg/día	7,15 €/kg	501
Costes de mantenimiento			4.795
Mano de obra			25.000
Kit recambios descalcificador Kit recambios filtro Kit recambios unidad OI			2.431
TOTAL			33.526

Para la estimación económica se ha supuesto que la mitad de la producción del agua se hace partiendo del agua de red y la otra mitad se hace partiendo del agua de pozo.

8.4.- COSTE €/l

Para el cálculo del coste del litro de agua tratada es necesario tener en cuenta tanto los costes de inversión como los costes de explotación.

En los costes de inversión se engloban los costes de los equipos (93.956€) y los de instalación de los mismos (145.000 €), lo que supone un total de 238.956€.

Para anualizar los costes de inversión, se recurre al factor de recuperación del capital, el cual depende del interés del dinero y de los años de amortización, tal y como se define en la Ecuación 21:

$$FRC = \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \quad (21)$$

En la Figura 8.1 se muestra una representación de la variación del FRC en función del interés y del número de años. En ella se aprecia como el FRC crece de forma acusada a medida que desciende el número de años de amortización y crece de forma leve conforme aumenta el interés:

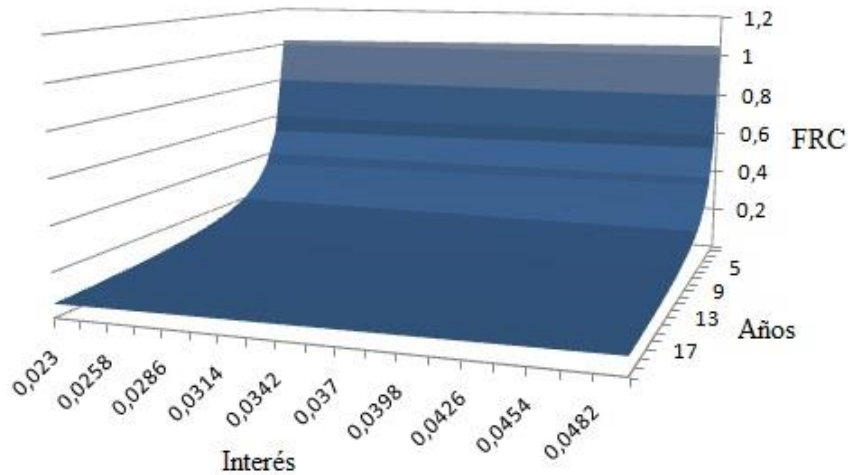


Figura 8.1: FRC en función del interés y los años de amortización

Se ha optado por un periodo de amortización de 12 años con un interés del 3%, con lo que se tiene un FRC de 0,1 en la Ecuación 22:

$$FRC = \frac{0,03(1+0,03)^{12}}{(1+0,03)^{12}-1} = 0,1 \quad (22)$$

En la Ecuación 23 se calcula el coste de inversión anualizado:

$$Coste\ anualizado = Coste\ de\ inversión \cdot FRC = 238.956€ \cdot 0,1 = 23.895,6 \frac{€}{año} \quad (23)$$

Los costes de explotación ascienden a 33.526 €/año.

El coste total anualizado es la suma de los dos costes anteriores, 57.421,6 €/año.

El coste en euros de cada litro se obtiene dividiendo el coste total anualizado por el número de litros que se producen al año, como se indica en la Ecuación 24:

$$Coste\ del\ litro = \frac{57.421,6 \frac{€}{año}}{400000 \text{ L/año}} = 0,14 \text{ €/l} \quad (24)$$

9 CONCLUSIONES

En este último apartado se exponen las conclusiones principales obtenidas del trabajo:

-El volumen de agua a tratar se ha impuesto tomando como referencia los volúmenes de producción de las cerveceras artesanales españolas, colocándose la producción de este trabajo entre las más grandes del país.

-La técnica elegida para eliminar el cloro libre es la filtración con carbón activo frente a la adición de productos químicos, ya que este método es más seguro a la hora de eliminar los compuestos orgánicos, y menos perjudicial para las membranas de ósmosis inversa.

-La remineralización se lleva a cabo por adición de productos químicos, ya que es la técnica más empleada en las cervecerías artesanales y la que mejor se adapta a los perfiles deseados, ya que la precisión necesaria se alcanza con este sistema.

-Se centralizará el control de la planta en un cuadro de control que permite ver y controlar todos los parámetros de la planta.

-De los perfiles seleccionados se obtiene una clara conclusión, la gran diferencia en la cantidad de sales que hay que añadir a cada una de las aguas. El agua destinada a alcanzar el perfil de Pilsen es mucho más fácil de tratar debido a la baja cantidad de sales disueltas que caracterizan a esta agua, su ajuste es mucho más preciso y fácil de conseguir y solo es necesaria una pequeña cantidad de sales (8 g de CaCO_3 , 1 g de NaHCO_3 , 5 g de MgSO_4 y 1 g de NaCl). Por el contrario, el agua utilizada para el perfil de Dortmund requiere un tratamiento más complejo que, al contar con una mayor cantidad de sales disueltas, tiene un ajuste menos preciso y costoso de conseguir. La cantidad de sales es muchísimo mayor (145 g CaCO_3 , 11 g NaHCO_3 , 20 g CaSO_4 , 100 CaCl_2 , 80 MgSO_4 , 13 g NaCl), llegando varios iones a encontrarse en una proporción de más de diez a uno con respecto a la cantidad de los mismos en el agua de Pilsen. Sin embargo, a pesar de esta marcada diferencia, la duración del tratamiento y el procedimiento son muy similares y pueden tratarse con los mismos equipos.

-El coste del litro de agua (0,14 €) es suficientemente bajo como para poder obtener un beneficio de la venta de la cerveza sin necesidad de disparar el precio.

10 BIBLIOGRAFÍA

Figura 1.1: El Taller Cervecerero. (2012). Grano después de la molienda. Consultado el 31 de Agosto de 2019 de

https://www.google.com/search?q=molienda+de+malta&rlz=1C1CAFB_enES721ES724&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=0ahUKEwjB1qGH9qzkAhVztHEKHfYnA2IQ_AUIESgB&cshid=1567248315391499&biw=1242&bih=632&dpr=1.1#imgrc=wLYpzm6WH-WZCM

Figura 1.2: Alchemixing. (2016). ¿Qué es la maceración?. Consultado el 31 de Agosto de 2019 de

<https://alchemixing.es.wordpress.com/2016/12/05/que-es-la-maceracion/>

Figura 1.3: Lauterstar. (2019). LAUTERSTAR™. Consultado el 31 de Agosto de 2019 de

<https://www.gea.com/es/products/gea-lauterstar.jsp>

Figura 1.4: Por la cerveza libre. (2013). Flor de lúpulo. Consultado el 31 de Agosto de 2019 de

<https://porlacervezalibre.wordpress.com/2013/09/25/lupulo-el-corazon-de-la-cerveza/>

Figura 1.5: Cerveza Artesana. (2019). Fermentador atmosférico termoaislado 1000 L. Consultado el 1 de Septiembre de 2019 de

<https://www.cervezartesana.es/fermentador-atmosferico-termoaislado-1000-lt-mqfe040.html>

Figura 1.6: Cervezas Enigma. (2019). Acabado y expedición. Consultado el 1 de Septiembre de 2019 de

<http://www.cervezasenigma.com/es/mundo-enigma/proceso-de-elaboracion>

Figura 2.1: Vilches Arenas, L. F. (2019). El agua en la fabricación de cerveza.

Figura 5.2: Figura 5.3, Figura 5.4: Brewer's Friends. (2020). Consultado el 14 de Mayo de 2020 de

<https://www.brewersfriend.com/water-chemistry/>

Figura 7.12: Lenntech. (2020). Membranas Hydranautics. Consultado el 8 de Mayo de 2020 de

<https://www.lenntech.es/productos/membrane/hydranautics-membranes.htm>

[1] Cervezas Enigma. (2019). Proceso de Elaboracion de Nuestras Cervezas. Consultado el 31 de Agosto de 2019 de

<http://www.cervezasenigma.com/es/mundo-enigma/proceso-de-elaboracion>

[2] Cerveceros.org. (2016). Informe socioeconómico del sector de la cerveza en España. Consultado el 31 Agosto de 2019 de

https://cerveceros.org/uploads/5b30d4612433a_Informe_Cerveceros_2017.pdf

[3] Vilches Arenas, L. F. (2019). El agua en la fabricación de cerveza.

[4] Luisal Chanel. (2015). Taller aguas o como conseguir tu agua cervecera. Consultado el 20 de Mayo de 2019 de

<https://www.youtube.com/watch?v=Ye7hGOUcWs&t=2192s>

[5] Somos Cerveceros. (2011). Agua. Consultado el 19 de Mayo de 2019 de

<http://somoscerveceros.com/2011/03/03/agua/>

[6] fabricarcerveza.es. (2019). El agua, características y uso en la elaboración de cerveza. Consultado el 21 de Mayo de 2019 de

<https://www.fabricarcerveza.es/blog/el-agua-caracter%C3%ADsticas-y-uso-en-la-elaboraci%C3%B3n-de-cerveza>

[7] Se ha obtenido del video referenciado en [4]

- [8] Filtración de arena. HIDROS. Tecnología del agua. Manual Filtración Ref. Edición controlada: 07/2002.
- [9] Hydranautics. (2017). Chemical pretreatment for RO and NF. Technical Application Bulletin No.111 Revision C. Consultado el 14 de Mayo de 2020 de <https://membranes.com/wp-content/uploads/2017/06/TAB-111.pdf>
- [10] Brewer's Friend (2020). Brewing water chemistry calculator. Consultado el 14 de Mayo de 2020 de <https://www.brewersfriend.com/water-chemistry/>
- [11] https://www.electrobombas.es/bombas-de-agua-de-superficie/864190-bomba-multicelulare-verticales-u7v-300-6.html?gclid=EAlaIQobChMllsvfnYyl6QIVF7TVCh2L1QzeEAQYAiABEgLJ1fD_BwE Consultado el 8 de Mayo de 2020.
- [12] <http://www.abrilehijos.com/images/Tarifas/INSOL-descalcificador-filtros-tarifa.pdf> Consultado el 8 de Mayo de 2020.
- [13] <https://www.lumexinstruments.es/catalog/analizador-de-agua-automatico/akmc-1.php#specification> Consultado el 8 de Mayo de 2020.
- [14] https://spanish.alibaba.com/product-detail/medidor-de-flujo-digital-rs485-electromagnetic-water-flowmeter-with-analog-output-62570813291.html?spm=a2700.md_es_ES.deiletai6.15.359b2f399rTCPP Consultado el 8 de Mayo de 2020.
- [15] <https://spanish.alibaba.com/product-detail/lmi-pd046-728ni-dosing-metering-pump-62169521569.html?spm=a2700.galleryofferlist.0.0.75a72b5dXXLbv0> Consultado el 8 de Mayo de 2020.
- [16] <https://www.pepepool.com/deposito-polietileno-dosificador-productos-quimicos-astralpool-01315> Consultado el 8 de Mayo de 2020.
- [17] <https://spanish.alibaba.com/product-detail/in-line-mixer-static-intensive-online-homogenizer-pump-62112991929.html?spm=a2700.galleryofferlist.0.0.42622f880hpyli&s=p> Consultado el 8 de Mayo de 2020.
- [18] <https://spanish.alibaba.com/product-detail/automatic-backwash-pressure-gravel-sand-filter-62043156531.html?spm=a2700.galleryofferlist.0.0.573f3de0j1jtvB> Consultado el 8 de Mayo de 2020.
- [19] <https://www.pepepool.com/deposito-polietileno-dosificador-productos-quimicos-astralpool-57613> Consultado el 8 de Mayo de 2020.
- [20] <https://www.prominent.es/es/Productos/Productos/Sistemas-de-medici%C3%B3n-y-regulaci%C3%B3n-y-sensores/Sensores/p-dulco-turb-c.html#application> Consultado el 8 de Mayo de 2020.
- [21] <https://www.pepepool.com/filtro-cartucho-astralpool-serie-terra100-codigo-18112> Consultado el 8 de Mayo de 2020.
- [22] <https://spanish.alibaba.com/product-detail/water-treatment-system10000-lph-with-frp-membrane-vessel-food-grade-tanks-ro-plant-osmosis-inversa-60272952986.html?spm=a2700.galleryofferlist.0.0.67f146cd1GUu61> Consultado el 8 de Mayo de 2020.
- [23] <https://www.pepepool.com/deposito-polietileno-dosificador-productos-quimicos-astralpool-28831> Consultado el 8 de Mayo de 2020.

[24] <http://www.agpbombas.com/catalogo.pdf> Consultado el 8 de Mayo de 2020.

[25] <https://spanish.alibaba.com/product-detail/stainless-steel-mixing-vat-pressure-tank-500-liter-to-10-000-liter-60573792913.html> Consultado el 8 de Mayo de 2020.

[26] <https://spanish.alibaba.com/product-detail/micro-twin-screw-dosing-system-for-powder-62356644132.html?spm=a2700.galleryofferlist.0.0.7dd27561cys9Sp> Consultado el 10 de Mayo de 2020.

[27] http://www.infesa.com.ar/media/taux_productos/pdf/23_21_es.pdf Consultado el 10 de Mayo de 2020.