



Optimización del sistema de filtración y estabilidad coloidal para una cervecera multiproducto de tamaño medio.

PROYECTO FIN DE CARRERA

Escuela de Ingeniería y Arquitectura. Universidad de Zaragoza.
La Zaragozana S.A.

Ingeniero Químico

DIRECTOR

Antonio Fumanal Sopena
Maestro cervecero.
La Zaragozana S.A.

CODIRECTORA

Ascensión Prieto Martín
Responsable de laboratorio.
La Zaragozana S.A.

PONENTE

María Pilar Aznar
Departamento de Ingeniería Química y TMA.
Escuela de Ingeniería y Arquitectura.

AUTORA:

Carmen Elena Tertre Fantacchiotti.

RESUMEN Y OBJETIVOS

El presente Proyecto Fin de Carrera se realiza en la empresa cervecera “La Zaragozana S.A.”, una cervecera de gran tradición fundada en 1900 en la ciudad de Zaragoza.

El presente proyecto estudia una mejora en el proceso de filtración de la cerveza verde.

Los objetivos del proyecto son:

- Optimizar los parámetros de operación del filtro; para ello se realiza lo siguiente:
 - Se realiza un histórico de datos de las filtraciones.
 - Se caracteriza el filtro.
 - Se analizan las variables modificables que pueden influir en el filtrado y las relaciones entre las mismas.
 - Se determina que la variable más influyente es la permeabilidad. La permeabilidad varía en el tiempo en función de la cantidad filtrada, la tasa de adición coadyuvante y la concentración de levaduras de la cerveza verde.
 - Se estudia el fluido a filtrar: la viscosidad, la relación levaduras-turbidez, la forma y tamaño de las levaduras.
 - Se modela teóricamente la ocupación de los sólidos en el filtro.
 - Se halla la composición óptima de la torta de filtración para los coadyuvantes actuales.
 - Se realizan pruebas industriales de validación del modelo de filtrado propuesto.

- Estudiar la viabilidad técnica y económica de la sustitución de los coadyuvantes de filtración actuales, y para ello se realiza lo siguiente:
 - Se realizan pruebas en el laboratorio comparando las diferentes permeabilidades entre diatomeas y celulosas y comparando la capacidad de retención de sólidos.
 - Se realizan filtraciones en el sistema real comparando dos tipos de celulosas. Se determina que el mejor funcionamiento como coadyuvante de aluvionado viene dado con la celulosa Vitacel[®] L60.
 - Se estudia el comportamiento de Vitacel[®] L60 en el filtro real.
 - Se comprueba que el uso de celulosa tipo Vitacel[®] L60 es viable técnicamente.
 - Se analiza de forma teórica los costes operativos anuales del filtro, comparando la utilización de diatomeas y celulosas como coadyuvantes.

Se desarrolla un modelo contrastado con datos experimentales del funcionamiento del filtro. Se proponen nuevas vías de operación que permiten mejorar el sistema actual.

Índice

Glosario	1
1 Introducción.....	2
1.1 Proceso de elaboración de la cerveza.	2
1.2 Parámetros de calidad de la cerveza filtrada.	4
1.2.1 Transparencia.	4
1.2.2 Estabilidad coloidal.	4
1.2.3 Otras especificaciones.....	7
2 Estado del arte	8
2.1 Teoría de la filtración. Ley de Darcy.	8
2.2 Parámetros a estudiar en la filtración en torta.....	10
2.2.1 Coadyuvantes de filtración.....	10
2.2.2 Tipos de coadyuvantes de filtración para la cerveza.	12
2.3 Mecanismos de filtración: Tamizado y adsorción.	14
2.4 Equipo de filtración: Filtro de candelas	15
2.5 Esquema del sistema de filtración.....	16
2.6 Dificultades en el proceso de filtración	16
3 Desarrollo experimental	17
3.1 Dimensionamiento del filtro y precapa de filtración.....	17
3.1.1 Precapa.....	18
3.2 Relación de la turbidez en cerveza verde con la concentración de levaduras y el periodo de guarda.....	20
3.3 Estudio de los parámetros de la ley de Darcy en el filtro de candelas.	20
3.3.1 Viscosidad.....	20
3.3.2 Permeabilidad.....	25
3.3.3 Área y espesor del lecho.	25
3.4 Comportamiento del sistema bajo las condiciones actuales de operación.....	26
3.4.1 Modo de operación actual. Aluvionado.	26
3.4.2 Ciclo de filtración	27
3.4.3 Condiciones de operación constantes.	28
3.4.4 Variación en las condiciones de operación.	33

3.4.5	Conclusiones obtenidas. Funcionamiento actual del filtro.	38
3.5	Optimización del sistema actual	39
3.5.1	Resultados	39
3.5.2	Conclusiones.....	43
3.6	Celulosa como coadyuvante.	44
3.6.1	Pre-estudio del comportamiento de las celulosas en el laboratorio.....	44
3.6.2	Prueba industrial con celulosas.	46
4	Comparativa teórica de costes de filtración.	53
4.1	Comparabilidad entre diatomeas y celulosas.	53
4.1.1	Diatomeas	53
4.1.2	Celulosas.....	55
4.2	Costes generados en cada ciclo de filtración.	56
4.3	Costes anuales de filtración.	58
4.4	Conclusiones del estudio económico.	59
5	Conclusiones	60
6	Bibliografía.....	63

ANEXOS

Anexo I.	Proceso de producción de la cerveza	I
Anexo II.	Nefelómetro.....	II
Anexo III.	Flujo en el interior del filtro	III
Anexo IV.	Análisis de ayudas filtrantes (Proveedores).....	IV
Anexo V.	Estudio de la relación entre turbidez, levadura y periodos de guarda.	V
Anexo VI.	Estudio de diámetro de las levaduras	VI
Anexo VII.	Estudio de la permeabilidad en el laboratorio.....	VII
Anexo VIII.	Viscosidad dinámica	VIII
Anexo IX.	Ensayo de numeración de levaduras y viabilidad	IX
Anexo X.	Histórico de datos.	X

Glosario

CERVEZA VERDE: Cerveza obtenida tras la fermentación. Es una cerveza apta para el consumo pero no es transparente debido a la presencia de levadura y proteínas.

COADYUVANTE DE FILTRACIÓN: sólidos que se introducen al filtro junto al fluido a filtrar. Ayudan a mantener la permeabilidad del lecho de filtración al mismo tiempo que retienen los sólidos en suspensión del fluido que se filtra.

ALUVIONADO: Coadyuvantes de filtración que se introducen durante el ciclo de filtración.

PRECAPA: Estrato primario que se coloca como primer lecho de filtración. Se forma antes de que comiencen las filtraciones.

TIERRAS DIATOMEAS: Son esqueletos de algas unicelulares. Sus características físicas hacen que sean utilizadas comúnmente como coadyuvante de filtración:

CICLO DE FILTRACIÓN: Hace referencia a la vida del filtro desde que se forma la precapa, hasta que el filtro se limpia.

LOTE DE FILTRACIÓN: Hace referencia a un volumen de cerveza filtrada dentro del ciclo. Este volumen corresponde al volumen del tanque de almacenamiento de cerveza filtrada, son aproximadamente 300HI.

EBC: acrónimo de European Brewery Convention.

1 Introducción

La cerveza es una bebida fermentada. La más consumida se caracteriza por su ligera carbonatación, color ambarino y su sabor amargo. Normalmente la cerveza presenta un brillo transparente. La transparencia de la cerveza se consigue mediante la filtración de la denominada *cerveza verde*. En La Zaragozana esta filtración se lleva a cabo en un *filtro de candelas*. Este proyecto se centra en el estudio de este sistema de filtración.

Históricamente la cerveza fue producida por primera vez en el siglo IV a.C. por los sumerios en el sur de Babilonia. Sin embargo la bebida que hoy identificamos como cerveza nace en Alemania en la Baja Edad Media, cuando se originó la costumbre de cocer el mosto con flores de lúpulo. El lúpulo sustituyó a los aromatizantes utilizados hasta ese momento, dando a la cerveza su amargor característico. Además de proporcionar amargor, el lúpulo ayuda a conservar la cerveza por su fuerte acción antiséptica.

En este proyecto se optimiza el modo de operación del filtro, manteniendo los coadyuvantes de filtración (tierras diatomeas). Por otro lado se estudiará la viabilidad tanto técnica como económica de la sustitución de los coadyuvantes actuales (tierras de diatomeas) por celulosa.

La utilización de celulosa como coadyuvante de filtración es usada en algunas empresas pioneras dedicadas a la elaboración de zumos o vinos; hasta el momento no se utiliza como coadyuvante en ninguna empresa cervecera.

1.1 Proceso de elaboración de la cerveza.

La materia prima principal para la elaboración de la cerveza, es la cebada. Ésta se somete a un proceso de malteado y de molienda tras lo que se obtiene harina de malta.

La harina de malta se cuece a temperatura controlada. En esta etapa se añade el lúpulo y también se suelen añadir otras fuentes de almidón, como son el arroz o el maíz. Se obtiene un mosto dulce rico en azúcares.

El paso fundamental en la elaboración de la cerveza es la fermentación del mosto, tras la que se obtiene cerveza verde. Durante la fermentación se transforman los azúcares simples que contiene el mosto en etanol y dióxido de carbono.

La filtración final retira los sólidos en suspensión, mayoritariamente células de levadura, para obtener una cerveza brillante.

Tras la filtración la cerveza se pasteuriza y se envasa para su distribución.

A continuación se representa el proceso de elaboración de la cerveza de forma esquemática.

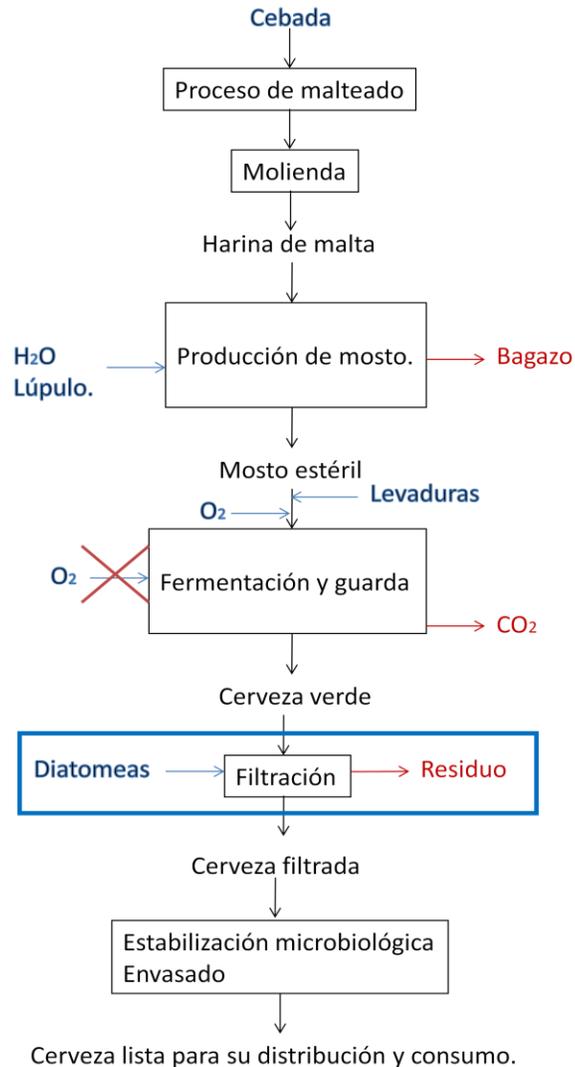


Imagen 1-1. Esquema de fabricación de cerveza

El proceso de elaboración de la cerveza se puede dividir en cinco grandes bloques:

- 1- Proceso de malteado.
- 2- Producción de mosto.
- 3- Fermentación y guarda.
- 4- Filtración, y estabilización microbiológica.**
- 5- Envasado.

En este proyecto se estudia la etapa de filtración. En el filtro se introduce cerveza verde y se obtiene cerveza filtrada. La cerveza que sale del filtro se analiza para comprobar que se cumplen los parámetros de calidad requeridos.

1.2 Parámetros de calidad de la cerveza filtrada.

El parámetro de calidad que depende directamente de la filtración es la transparencia de la cerveza. La cerveza debe ser transparente después del filtrado, esta característica debe permanecer durante los periodos de almacenamiento hasta su consumo.

Otros parámetros de calidad medidos a la salida del filtro pero que no dependen de forma tan directa de la filtración son: el color de la cerveza, el porcentaje de alcohol, la estabilidad de la espuma, contenido en CO₂ y ausencia de oxígeno.

1.2.1 Transparencia.

La cerveza verde que se obtiene tras la fermentación es una cerveza apta para el consumo, pero contiene partículas en suspensión que la hacen turbia. Para conseguir la transparencia se filtra la cerveza en el filtro de candelas.

Una cerveza que no sea transparente y brillante se denomina cerveza turbia. La turbidez es un fenómeno óptico causado por la presencia de partículas sólidas suspendidas en un líquido. Las partículas sólidas hacen que la luz se desvíe de su curso normal al incidir sobre ellas.

La turbidez se puede medir cuantitativamente mediante un nefelómetro, su unidad es el grado EBC.

El ojo humano distingue turbidez a partir de un grado EBC como norma general. Una cerveza que tenga una turbidez menor de 0,7 grados EBC, cumplirá los requisitos para que la cerveza sea considerada transparente y brillante.

1.2.2 Estabilidad coloidal.

A la salida del filtro la cerveza es transparente. Hemos de asegurar que esta característica se mantenga hasta el momento de su consumo. Es decir, hay que asegurar que la cerveza sea estable a lo largo del tiempo y no se formen coloides que generen turbidez.

Formación de la Turbidez. Tipos

La turbidez que puede aparecer durante los periodos de almacenamiento se suele formar por interacciones entre las proteínas y los polifenoles presentes en la cerveza.

Los polifenoles que se encuentran en la cerveza son de distintos tipos: monómeros (tipo Catequina), dímeros (denominados flavonoides) y polímeros (o Tanoides).

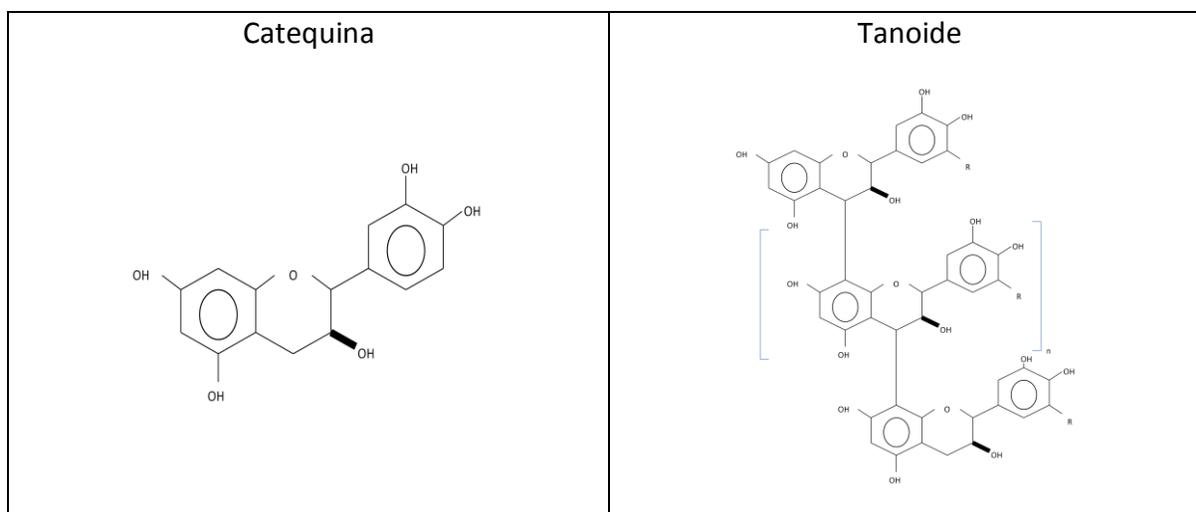


Imagen 1-2. Polifenoles.

Los flavonoides simples (Catequinas) no producen turbidez. Forman puentes de hidrógeno con la proteína y contribuyen muy poco a la turbidez visible.

Una primera y ligera oxidación de las catequinas origina la formación de los flavonoides. Éstos tienden a polimerizar para producir cadenas cortas de polifenoles. Los flavonoides oxidados tienen la capacidad de unir un determinado número de proteínas mediante puentes de hidrógeno. Esto provoca la llamada *turbidez al frío*, en la que se forman coloides a temperaturas menores que 0°C. Esta turbidez es reversible a una temperatura aproximada de 20°C. En este periodo la estructura está todavía bastante suelta.

La filtración de la cerveza se realiza en frío para poder atrapar estos coloides.

Los flavonoides totalmente oxidados (polímeros llamados taninos) producen *turbidez permanente*. Esta oxidación se produce durante el almacenamiento en periodos prolongados, del orden de meses.

Los taninos se unen mediante puentes de hidrógeno a las proteínas, dando una estructura compleja que no es fácilmente reversible. La unión de tanoides oxidados con proteínas afecta tanto a la turbidez de la cerveza como al sabor de la misma.

La velocidad de formación de turbidez es proporcional a la velocidad de desaparición de polifenoles para formar taninos.

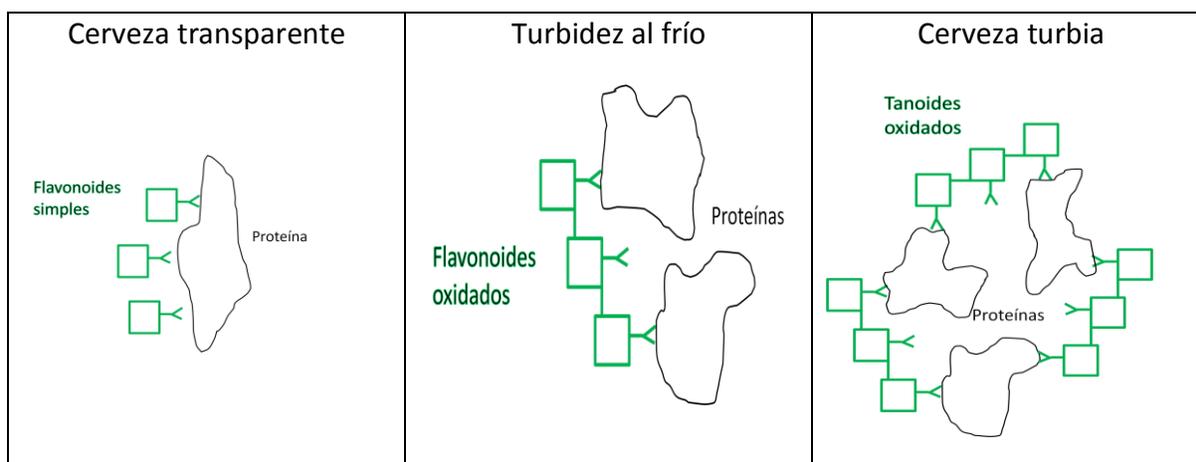


Imagen 1-3. Mecanismos de desarrollo de la turbidez coloidal.

Uno de los factores críticos que promueven la oxidación de los flavonoides es el oxígeno. Por lo tanto es importante impedir el contacto de la cerveza con el aire antes de ser envasada para evitar el proceso de oxidación de la cerveza.

Además de evitar el contacto del oxígeno con la cerveza, se pueden tomar otras medidas:

1. Adición de enzimas proteolíticas¹.
2. Adición de Polivinilpolipirrolidona (PVPP) antes de la filtración. El PVPP es un polímero que consiste en una columna vertebral de carbono a la cual están unidos anillos de pyrrolidona. El PVPP tiene una gran afinidad por los polifenoles; tiende a unirse a ellos a través de puentes de hidrógeno y enlaces iónicos. Al unirse colapsan, lo que hace que queden retenidos en el filtro. Las uniones que se forman entre los polifenoles y el PVPP son más fuertes que las uniones entre proteínas y polifenoles que causan turbidez.
3. Adición de Sílica antes de la filtración. La sílica se une a las proteínas que causan turbidez preferentemente a las proteínas que dan estabilidad a la espuma².

¹ Una proteasa clásica es la papaína. Extraída de la papaya, rompe las proteínas en fragmentos peptídicos cortos evitando que su tamaño llegue a ser visible.

² La sílica adsorbe proteínas en su estructura. Las proteínas que pueden formar turbidez son relativamente hidrofílicas con un peso molecular aproximado de 40.000. (Beer Filtration, Stabilization and Sterilization, 1999).

1.2.3 Otras especificaciones

En la etapa de filtración se controla también el color, la cantidad de alcohol, el contenido en CO₂ de la cerveza y la estabilidad de la espuma.

De estos parámetros la formación y estabilidad de la espuma son críticos en la evaluación de la calidad de una cerveza. Dependen principalmente de la presencia sustancias beneficiosas para su estabilización. La mayoría de estas sustancias son lipo-proteínas de alto peso molecular, aunque también contribuyen los ácidos del lúpulo y algunos metales.

2 Estado del arte

2.1 Teoría de la filtración. Ley de Darcy.

La filtración a estudiar es una filtración en torta. En este tipo de filtraciones los sólidos de la suspensión a filtrar se van acumulando sobre el medio filtrante. Conforme más volumen se filtre, más cantidad de sólidos se depositan sobre el medio filtrante y el espesor de la torta de sólidos será mayor.

La relación fundamental entre la caída de presión y la velocidad del fluido de un líquido que pasa a través de un lecho empacado de sólidos, fue descrita por primera vez por Darcy en 1856.

El líquido a filtrar pasa a través del espacio abierto entre las partículas (poros o huecos dentro del lecho). El fluido va perdiendo presión conforme atraviesa la superficie filtrante. Esta disminución de presión es debida a las pérdidas provocadas por el rozamiento del líquido sobre la superficie de los sólidos. Cuanto mayor sea la cantidad de sólidos dentro del lecho, mayor será la superficie sobre la que el líquido fluirá y, por tanto, mayor será la pérdida de carga debida a la fricción.

Darcy descubrió que la pérdida de presión es directamente proporcional a la velocidad de flujo del fluido.

La ley de Darcy solo es válida para flujo laminar.

$$\Delta P = \frac{\mu L Q}{\beta A}$$

Donde: ΔP (Pa) es la caída de presión del fluido al atravesar el lecho. μ (Pa*s) es la viscosidad del líquido. Q (m³/s) es el caudal volumétrico que pasa a través del lecho filtrante. A (m²) es el área transversal del lecho. L (m) es el espesor de la torta de sólidos. β (m²) es la permeabilidad del lecho.

Viscosidad (μ)

Es la oposición de un fluido a deformaciones tangenciales. Las unidades en las que se expresa habitualmente son Poises (P), centipoises (cP) o Pascal segundos (1CP = 10⁻³ Pa.s).

Normalmente la viscosidad de los líquidos disminuye cuando aumenta la temperatura. Cuanto más viscoso es el líquido más pronunciado es este efecto.

Velocidad real (Q/A)

El caudal que circula por un conducto es la velocidad del fluido por la sección transversal de paso del fluido.

Si la tubería está llena de sólidos el área de paso del fluido es mucho menor, ya que sólo puede circular por los espacios huecos que deja el sólido; además hay que considerar que el fluido probablemente no siga caminos rectilíneos.

La velocidad descrita por Darcy no tiene en cuenta ni la porosidad del lecho filtrante ni la tortuosidad que da el empaquetamiento de sólidos.

Permeabilidad (β)

La permeabilidad es la capacidad de un material poroso para que un fluido lo atraviese sin alterar su estructura interna. En el Sistema Internacional de Unidades la permeabilidad se expresa en m^2 . En la industria cervecera es comúnmente expresado en Darcys.

La correlación entre el Darcy y el valor de permeabilidad expresada en μm^2 es la siguiente:

$$1 \text{ Darcy} = 1.01325 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2 = 1.01325 \mu m^2.$$

La permeabilidad de la torta de filtración es una función de la porosidad, de la forma y empaquetamiento de las partículas, del tamaño y distribución de las partículas, del ratio al cual se forma la torta, de concentración de la suspensión que se filtra, etc.

En la parte de experimentación del presente proyecto se estudian cada una de las variables que afectan a la presión según la ley de Darcy en el sistema de filtración a estudiar.

2.2 Parámetros a estudiar en la filtración en torta.

El tipo de filtración de este sistema es una filtración en torta. Para el fluido que se filtra son necesarios coadyuvantes de filtración. Los coadyuvantes de filtración son sólidos que se introducen al filtro junto al fluido a filtrar. Ayudan a mantener la permeabilidad del lecho de filtración al mismo tiempo que retienen los sólidos en suspensión del fluido que se filtra.

Los mecanismos de filtración por los que la torta de filtración retiene a los sólidos en suspensión son el tamizado y la adsorción.

Los tipos de coadyuvantes utilizados más comúnmente en cervecería son: las tierras diatomeas, la celulosa y la perlita.

2.2.1 Coadyuvantes de filtración

Los coadyuvantes de filtración son sólidos que se introducen al filtro junto al fluido a filtrar. Ayudan a mantener la permeabilidad del lecho de filtración al mismo tiempo que retienen los sólidos en suspensión del fluido que se filtra.

La levadura y los sólidos en suspensión que contiene la cerveza verde son compactables y pequeños (del orden de micras). Si para eliminar este material se utiliza un solo medio filtrante, como, por ejemplo, una lámina de papel filtrante, se bloqueará el filtro rápidamente.

El bloqueo del filtro se debe a la resistencia que provocan los sólidos de la cerveza al acumularse sobre la superficie filtrante. Los sólidos presentes en la cerveza forman una torta de filtración de permeabilidad muy baja. Este problema se puede superar inyectando un material adecuado en la corriente de entrada al filtro llamado coadyuvante o ayuda filtrante.

Los coadyuvantes de filtración forman junto con la levadura y los sólidos en suspensión una torta de filtración incompresible que es capaz de mantener constante el flujo de cerveza y la permeabilidad del medio filtrante.

Todos los sistemas que utilizan ayuda filtrante tienen como base un soporte mecánico, como por ejemplo una red o una malla, conocido como Septum.

Sobre el Septum se forma en primer lugar la torta de filtración primaria o **precapa**.

Posteriormente se introduce en el filtro una mezcla de cerveza y ayuda filtrante. Esta ayuda filtrante se denomina **aluvionado** o cuerpo filtrante. El aluvionado junto con la levadura y otros materiales que forman turbidez, se acumulan progresivamente dando lugar a la torta de filtración. El aluvionado permite una renovación continua de la superficie filtrante.

2.2.1.1 Precapa

Para el funcionamiento óptimo del filtro la *European Brewery Convention* recomienda dos precapas. La primera actuará de interface entre el septum y la segunda precapa, o en el caso de que no haya segunda precapa entre el septum y el aluvionado.

Una primera precapa óptima tendrá una permeabilidad de $1\mu\text{m}^2$. El tamaño ideal es una ayuda filtrante en la que entre el 5 y el 10% de sus partículas sean mayores que la apertura nominal del septum. En el caso a estudiar la apertura nominal es el espacio entre las arandelas de las candelas que conforman el filtro. (Ver sección 3.1 *Equipo de filtración. Filtro de candelas*)

La segunda precapa normalmente tiene el mismo tamaño de partícula o la misma mezcla de tamaños de partículas que se usa para el aluvionado. Sin embargo esto lo determina cada fábrica de cerveza particularmente. Se puede no usar segunda precapa o que ésta contenga tamaños de partícula distintos al del aluvionado.

Un filtro bien diseñado necesitará de 2 a 4 mm para la primera precapa y menos para la segunda. Si se añade más cantidad de precapa sólo se usará más ayuda filtrante sin percibir ningún beneficio³.

2.2.1.2 Aluvionado

La cantidad de aluvionado se determina frecuentemente en cada cervecería por ensayo y error. Los rangos típicos van de 40 a 200 g de aluvionado/hl filtrado.

La cantidad necesaria está fuertemente afectada por las partículas de mayor tamaño presentes en la cerveza: las levaduras. Las levaduras representan la mayoría del contenido en sólidos de la cerveza. El contenido de levaduras varía en función de los tipos de cerveza, de los tanques de fermentación e incluso existen variaciones dentro del mismo tanque.

Una torta de ayuda filtrante puede retener entre el 20% y el 40% de sólidos en su volumen manteniendo la permeabilidad. Este porcentaje depende del tipo de ayuda filtrante utilizada.

La *European Brewery Convention* (EBC) recomienda empezar el ciclo de filtración dosificando tierras por encima del óptimo y posteriormente reducir la dosificación. Esta reducción se debe hacer a partir de la hora de operación, cuando el incremento de la presión con el tiempo sea constante. Dosificar por debajo del óptimo dará un ensuciamiento prematuro del filtro, lo que conllevará un ciclo de filtración más corto.

³ European Brewery Convention manual.

2.2.2 Tipos de coadyuvantes de filtración para la cerveza.

Los coadyuvantes utilizados en el sector alimentario tienen que ser inertes y no aportar olor ni sabor para que no afecten al alimento, en este caso la cerveza.

Es fundamental que tengan la capacidad de formar tortas incompresibles de alta permeabilidad para poder mantener el flujo de cerveza.

A continuación se describen las ayudas filtrantes que se usan normalmente en cervecería: diatomeas, perlita y celulosa.

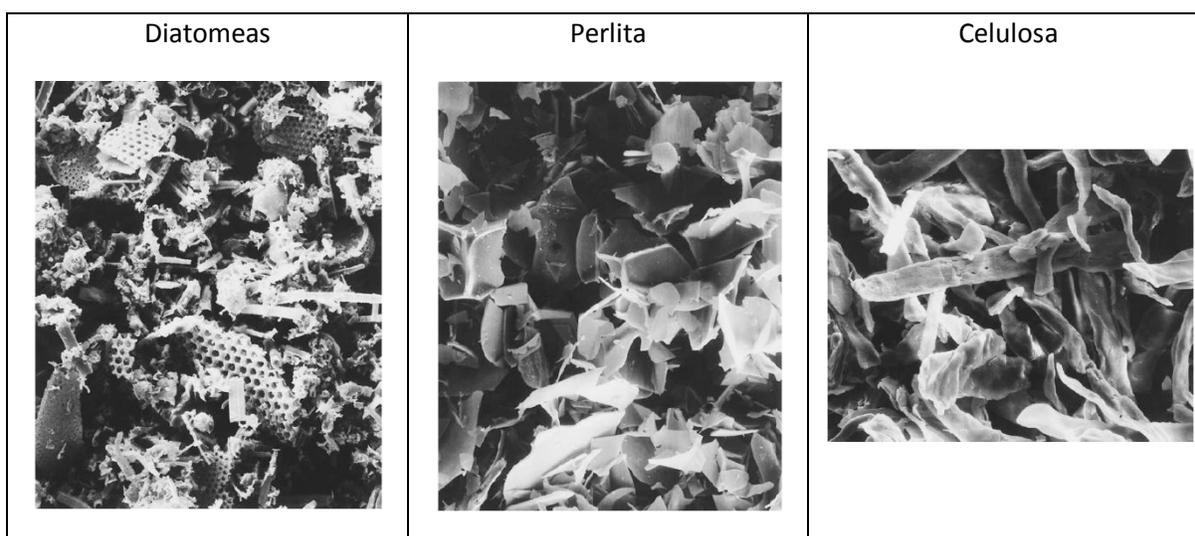


Imagen 2-1. Coadyuvantes de filtración⁴.

Tierras de diatomeas (Kieselguhr).

Son esqueletos de diatomitas, normalmente su composición es superior al 85% de sílica pura.

Las diatomitas son algas unicelulares. Cuando mueren, los restos de sus esqueletos se depositan en los lechos acuíferos en capas masivas. En esos lechos encontramos el material fosilizado, que se denomina diatomea, con una envoltura silícica externa que hace que su forma se conserve de manera permanente e indestructible.

Su particular estructura y composición química le dotan de las características de: estabilidad química, baja densidad global, alta capacidad de adsorción, gran área superficial y baja capacidad de abrasión. Gracias a estas características sirven como ayuda filtrante para la separación de los sólidos suspendidos en un medio fluido. La diatomea tiene una estructura altamente intrincada y porosa, que le permite una gran precisión en la separación.

⁴ Advances in filter aid and precoat filtration technology (1999)

La diferencia de formas y tamaños de las diatomeas dan como resultado ayudas filtrantes con distintas permeabilidades y tamaños, todas ellas con capacidad de ser usadas como coadyuvantes de filtración.

Las tierras diatomeas procesadas son también llamadas **Kieselguhr**.

Perlita

La perlita o silicato volcánico es un mineral de roca volcánica que contiene silicio. Después de un proceso de molienda y calentamiento se convierte en un polvo ligero y mullido. Es entonces cuando es útil como ayuda filtrante.

Al contrario que las diatomeas, las perlitas no tienen estructura porosa interna. Son planas con superficies suaves. Esto limita la efectividad de la perlita para quitar partículas submicrónicas en la filtración.

Celulosa

La celulosa se compone de moléculas ligadas de glucosa; consolida las paredes de las células de la mayoría de las plantas. Como la perlita, la celulosa posee una estructura interna menos intrincada que la diatomea.

La celulosa como filtrante tiene varias ventajas: mejora la capacidad de unión del material de la precapa en el tamiz del filtro, estabiliza la torta filtrante contra cambios bruscos de presión (la celulosa es más elástica que las ayudas filtrantes vistas anteriormente) y facilita su eliminación después de que la filtración sea completa. Otra gran ventaja del uso de celulosa es que se trata de un material degradable, por tanto, el residuo de la filtración puede ser quemado.

La celulosa es más compresible que las tierras diatomeas, es decir, a altas presiones la torta tiene más tendencia a comprimirse. Esto puede dar lugar a la liberación de partículas ya retenidas en la torta de filtración. Si la torta se comprime disminuirá la permeabilidad y por tanto se reducirá el caudal de cerveza que puede atravesar la torta.

Una desventaja del uso de esta ayuda filtrante es que el coste por kilo es mayor en comparación con el de las tierras de diatomeas y de las perlitas.

En la bibliografía consultada se encuentran estudios que describen el comportamiento de la celulosa como ayuda filtrante. Estos estudios son realizados para filtrar productos distintos a la cerveza, o para filtrar cerveza pero utilizando otros tipos de filtros.

Uno de los objetivos de este proyecto es determinar el funcionamiento de esta ayuda filtrante (celulosa) para el caso específico de filtración de cerveza en un filtro de candelas.

2.3 Mecanismos de filtración: Tamizado y adsorción.

Las filtraciones con ayuda filtrante tienen un buen rendimiento ya que permiten la filtración por tamizado y por adsorción.

La filtración por tamizado tiene lugar debido a que el aluvionado atrapa los sólidos dentro de los poros creados entre las partículas de ayuda filtrante.

La adsorción es debida a las interacciones entre las partículas de cerveza y el medio, tales como capturas electrostáticas o atracciones intermoleculares como Fuerzas de Van der Waals.

Debido a la presencia de precapas, los sólidos suspendidos en la cerveza tendrán que migrar a través de varios milímetros de lecho filtrante para salir del filtro. Por lo tanto las precapas juegan un papel muy importante a la hora de asegurar una buena calidad de filtración.

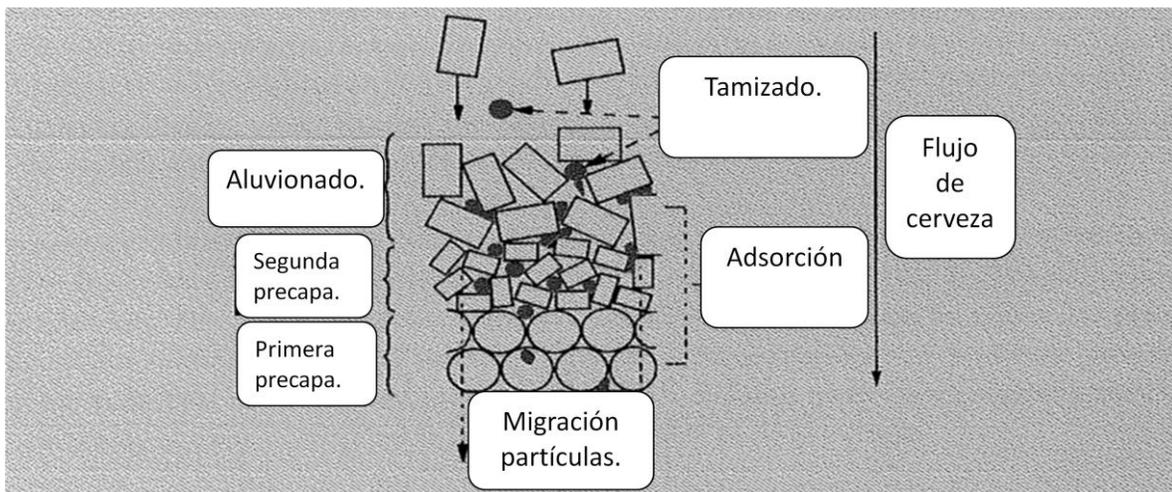


Imagen 2-2. Tamizado y adsorción

2.4 Equipo de filtración: Filtro de candelas

El filtro existente en “La Zaragozana” es un filtro de candelas marca Stella Metafilter modelo 5/42/340.

El filtro de candelas está formado por candelas largas tubulares colgadas de un plato de presión común rígido horizontal contenido en un recipiente. Las candelas están formadas por una pila de discos, diseñados con un espacio pequeño y fijo entre discos adyacentes. Es importante que el espacio entre arandelas sea siempre el mismo (apertura nominal).

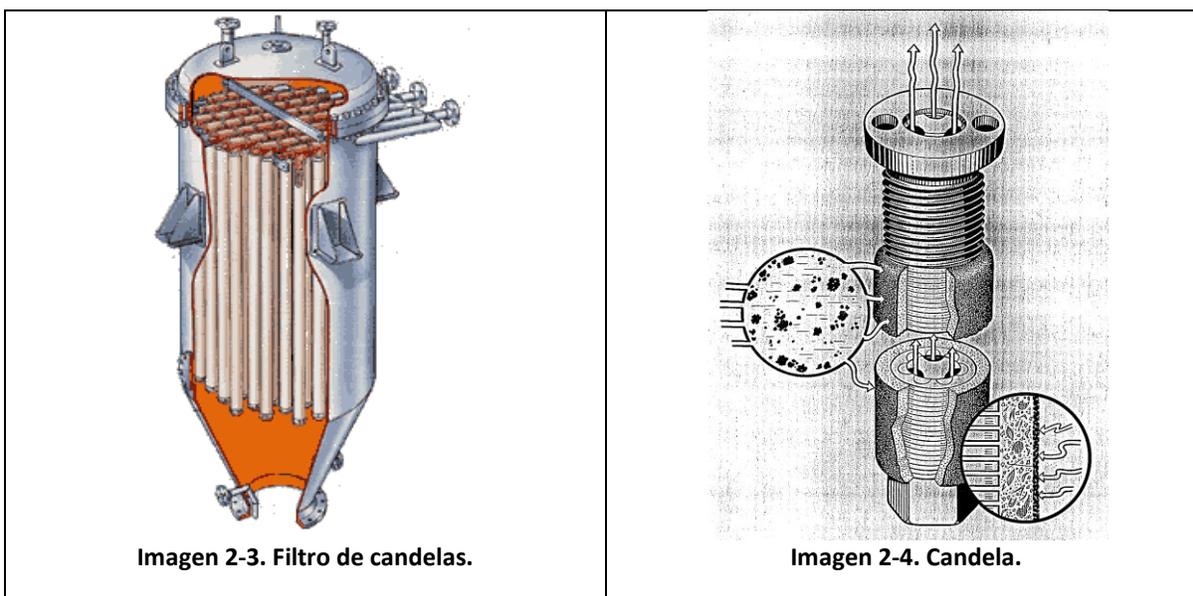


Imagen 2-3. Filtro de candelas.

Imagen 2-4. Candela.

La precapa se forma sobre la superficie de las candelas. El aluvionado y los sólidos retenidos se irán colocando sobre la precapa formando la torta de filtración. El espesor de la torta aumentará conforme se desarrolle el ciclo de filtración. Al aumentar el espesor de la torta, aumenta la superficie filtrante.

La cerveza verde entra al filtro junto con el aluvionado por la parte inferior del filtro. La diferencia de presión entre la entrada y la salida hace que se fuerce el paso de la cerveza verde a través de la torta de filtración. Al traspasar el lecho, las partículas sólidas quedan retenidas y la cerveza filtrada fluye por el interior de las candelas hacia la parte superior del filtro. Por encima del plato de presión se recoge la cerveza filtrada y se dirige hacia el exterior del filtro por una tubería en la que hay un visor. Este visor permite actuar con rapidez en caso de que la cerveza salga turbia.

El objetivo de control es añadir ayuda-filtrante para que la diferencia de presión se alcance de manera lineal con el volumen filtrado.

El diseño óptimo del filtro tiene lugar cuando el fin del ciclo de filtración debido a la pérdida de permeabilidad (aumento lineal de la diferencia de presión con respecto del volumen filtrado) se

produce en el mismo momento en el que el filtro se satura de tierras (se ocupa todo el volumen libre del filtro destinado a ayuda filtrante).

2.5 Esquema del sistema de filtración.

La cerveza verde fría pasa por una tubería por donde se le inyecta una suspensión compuesta de ayuda filtrante y agua a la que se le ha extraído el oxígeno disuelto (agua desoxigenada). La suspensión se ha formado previamente en el tanque de aluvionado, donde se mantiene en agitación. La tubería, que contiene cerveza verde y coadyuvantes de filtración, introduce el fluido por la parte inferior del filtro. El fluido filtrado sale por la parte superior del filtro.

La presión a la salida del filtro debe ser igual o mayor a 1 bar para que el CO_2 permanezca disuelto en la cerveza. La presión a la entrada del filtro nunca deberá superar los 5 bares debido al diseño del filtro.

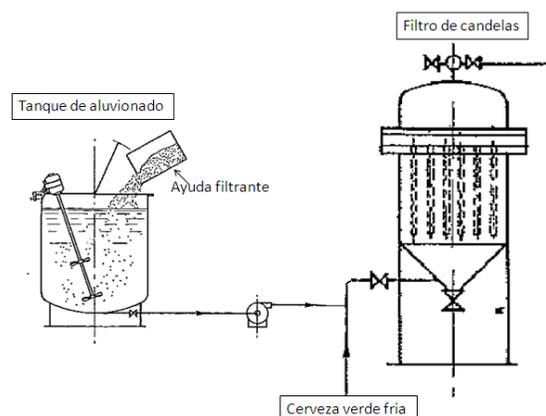


Imagen 2-5. Esquema del sistema de filtración.

2.6 Dificultades en el proceso de filtración

El sistema de filtración a estudiar es un sistema complejo. Las principales dificultades encontradas a la hora de abordar el estudio se detallan a continuación:

- Ausencia de estudios previos del sistema de filtración.
- Se realiza el proyecto en una cervecería multiproducto. Es decir, se filtran distintos tipos de cerveza.
- La experimentación se realiza sobre un sistema industrial en funcionamiento. El estudio está subordinado a las necesidades de producción.
- El filtro no es un sistema controlado automáticamente, es controlado manualmente.
- Las características del fluido a filtrar no son siempre las mismas. Las fermentaciones siguen un proceso biológico. De cada fermentación se obtiene una cerveza con características ligeramente diferentes.

3 Desarrollo experimental

En el presente proyecto se ha tenido la oportunidad de realizar experimentos a nivel industrial.

El presente apartado consta de los siguientes puntos:

- Dimensionamiento del filtro y precapa de filtración. Se estudia el espacio libre disponible en el ciclo de filtración.
- Estudio de las características del fluido a filtrar, entre ellos se encuentran: estudio de la relación levaduras-turbidez y estudio de la variación de la viscosidad en función de diversos parámetros.
- Estudio de parámetros que se ven influidos por el tipo de coadyuvante utilizado: permeabilidad, espesor de la torta filtrante, volumen ocupado, etc.
- Evaluación del comportamiento actual del filtro. Para ello se toman y se estudian datos de las filtraciones que se realizan normalmente en el sistema de filtración de "La Zaragozana".
- Variaciones de las condiciones de operación del filtro industrial. Optimización.
- Pre-estudio comparativo de la viabilidad de sustitución de los coadyuvantes (diatomeas y celulosas).
- Pruebas industriales de celulosa como aluvionado.

3.1 Dimensionamiento del filtro y precapa de filtración.

El filtro del que se dispone tiene las siguientes medidas físicas:

Diámetro del filtro = $D_{\text{filtro}} = 1,448 \text{ m}$.

Longitud filtrante de las candelas = $L = 110 \text{ cm}$.

Diámetro de las arandelas = $d_{\text{arandela}} = 2,86 \text{ cm}$.

Número de bujías o candelas = $N = 437$.

Con estos datos se pueden calcular la superficie de las bujías y su volumen:

$$S_{\text{bujía}} = \pi * d_{\text{arandela}} * L = 0,0988 \text{ m}^2$$

$$S_{\text{totbujías}} = S_{\text{bujía}} * N_{\text{bujías}} = 43,19 \text{ m}^2$$

$$V_{\text{bujía}} = \pi * \frac{d_{\text{arandela}}^2}{4} * L = 0,707 * 10^{-3} \text{ m}^3$$

$$V_{\text{totbujías}} = V_{\text{bujía}} * N_{\text{bujías}} = 0,3088 \text{ m}^3$$

El volumen libre que queda entre las candelas y el recipiente que las contiene es el que se considera interesante para este estudio. Si los sólidos ocupasen todo este volumen libre distribuyéndose de manera uniforme, habría problemas a la hora de limpiar el filtro.

$$V_{\text{libre}} = \pi * \frac{D_{\text{filtro}}^2}{4} * L - V_{\text{totbujías}} = 1,811 - 0,3088 = 1,5026 \text{ m}^3$$

3.1.1 Precapa

En este estudio se considera la precapa como parte del medio filtrante inicial. La composición de la precapa no se modificará.

La precapa se forma haciendo pasar suspensiones de agua con tierras de diferentes grosores por el filtro. Las suspensiones se recirculan hasta que toda la ayuda filtrante se ha quedado retenida en las candelas.

La primera suspensión está formada por 25 Kg de la tierra más gruesa (Difbo®). Actúa como una capa intermedia conectando los huecos en el septum. Es un soporte para las siguientes capas. En las hojas técnicas que se adjuntan en el *Anexo IV* se observa que el 16% de estas partículas son mayores de 80 micras⁵.

La segunda suspensión está formada por 20 Kg de una mezcla de tierras y celulosa (Fibroxcél10®). El Fibroxcél10 hace que la torta sea menos rígida y soporte mejor los cambios de presión.

La tercera suspensión está formada por 20 Kg de una tierra de grosor intermedio (CBR®). El 5% de estas partículas tienen un diámetro mayor de 50 micras.

La cuarta suspensión está formada por 10 Kg de la tierra más fina que se usa (CBL3®). Sólo 3% de estas partículas tienen un diámetro superior a 50 micras.

Tabla 3-1. Composición de la precapa.

Cantidad (Kg)	Tipo	Observaciones
25	Difbo	Más gruesa
20	Fibroxcél	Da flexibilidad
20	CBR	Grosor intermedio
10	CBL3	Más fina.

Las suspensiones se introducen en el interior del filtro mediante una bomba hidráulica colocada a la entrada del mismo.

La cantidad total de precapa que se introduce al filtro son 75 Kg.

La densidad de las tierras de diatomeas oscilan en función del lote. Se toma como densidad media 0,435 g /cm³. Con cada lote de tierras viene una hoja de análisis, se adjunta un ejemplo en el *Anexo IV*.

El volumen de tierras que se introduce en el interior del filtro para la precapa es:

⁵ Se cumplen las recomendaciones de la EBC. Ver apartado 2.2.1.2.

$$V_{precapa} = \frac{Kg_{precapa}}{\rho_{tierras}} = 0,172m^3$$

Suponiendo que la distribución de las tierras dentro del filtro es uniforme el volumen de tierras que rodea a cada bujía es:

$$V_{prec/bujia} = \frac{V_{precapa}}{N_{bujías}} = 0,394 * 10^{-3}m^3$$

En cada bujía tenemos un volumen total igual a:

$$V_{buj+prec} = V_{bujia} + V_{precapa} = 0,707 * 10^{-3} + 0,394 * 10^{-3} = 1,101m^3$$

El espesor de tierra alrededor de cada bujía y la superficie de filtración son:

$$l_{prec} = \sqrt{\frac{V_{buj+prec}}{\pi * L} - \frac{D_{bujia}^2}{4}} = 3,55mm$$

$$S_{precbujia} = 2 * \pi * \left(\frac{d_{bujia}}{2} + l_{prec} \right) * L = 0,123m^2$$

$$S_{prectot} = S_{precbujia} * N = 53,92m^2$$

$$V_{max\ torta\ filtrante} = V_{vacío\ filtro} - V_{precapa} = 1,5026 - 0,172 = 1,3306m^3$$

Aunque el volumen que puede ocupar la torta de filtración junto con la precapa en el interior del filtro es 1,3306 m³, por motivos de seguridad y para facilitar la limpieza del filtro se considerará que el volumen máximo que ocupará la torta de filtración dentro del filtro es el 90% de este valor, es decir, **1,1975 m³**.

Tabla 3-2. Volúmenes y superficies del filtro

Filtro				
1 bujía		Total bujías		Vacío filtro
V (m3)	S (m2)	V (m3)	S (m2)	V (m3)
0,707*10 ⁻³	0,0988	0,3088	43,19	1,5026

Tabla 3-3. Volúmenes y superficies filtro+precapa.

Filtro + precapa					
1 bujía			Total prec+bujías		Vmáx torta filtrante
V (m3)	S (m2)	l (m)	V (m3)	S(m2)	V (m3)
1,101*10 ⁻³	0,123	3,55*10 ⁻³	0,48	53,92	1,1975

3.2 Relación de la turbidez en cerveza verde con la concentración de levaduras y el periodo de guarda.

En el *Anexo V* se expone de manera detallada el estudio realizado para hallar las conclusiones que se detallan a continuación sobre este tema.

Existe una relación lineal directa entre la turbidez y la concentración de levaduras:

$$\text{Turbidez [H90]} = a \cdot \text{Concentración}_{\text{levaduras}} [\text{millones de levaduras/ml}] + b$$

La pendiente "a" oscila entre 11 y 12.

Este resultado se obtiene para muestras con una concentración de levaduras mayor que 2 millones/ml y menor que 23 millones/ml.

Para concentraciones de levaduras por debajo de los 2 millones/ml la relación levaduras-turbidez es también lineal, pero la pendiente es mucho mayor. Los valores de turbidez aumentan de forma mucho más rápida conforme aumenta el número de levaduras. Esto lleva a pensar que para valores bajos de concentración de levaduras la turbidez es provocada en mayor medida por otros sólidos en suspensión.

Respecto a la relación entre la turbidez y el periodo de guarda se ha observado que la turbidez disminuye conforme aumenta el periodo de guarda en cada tanque de fermentación. Sin embargo, no existe una relación común que sigan todos los tanques de fermentación. La levadura en suspensión no presenta una relación lineal con los días de guarda.

3.3 Estudio de los parámetros de la ley de Darcy en el filtro de candelas.

A continuación se estudian los parámetros que según la Ley de Darcy influyen directamente en el aumento de presión en un sistema como el filtro de candelas.

La ley de Darcy se define como: $\Delta P = \frac{\mu L Q}{k A}$

La viscosidad (μ) depende del fluido que atraviesa el lecho.

El área que atraviesa el fluido (A), el espesor de la torta de filtración (L) y la permeabilidad (k) dependen del tipo de lecho sobre el que se esté filtrando.

El caudal (Q) es un parámetro que se puede controlar mediante una bomba hidráulica que fuerza el fluido a filtrar a través del filtro.

3.3.1 Viscosidad

La viscosidad (μ) es la oposición del fluido a deformaciones tangenciales. La viscosidad expresa la facilidad que tiene un fluido para fluir cuando se aplica una fuerza externa.

Se define, según la ley de Newton para fluidos Newtonianos, como el factor de proporcionalidad entre la tensión de cizallamiento (σ) y la velocidad de cizalla o velocidad de variación de la deformación (du/dy) con flujo lineal, y siendo constante la presión y la temperatura.

$$\sigma = \mu \frac{du}{dy}$$

En el caso a estudiar el fluido no tiene siempre las mismas características (porcentaje de alcohol, azúcares, millones de levadura por mililitro, etc.). Las características de la cerveza verde dependen de cómo haya fermentado la cerveza.

Por tanto, se considera necesario estudiar la relación existente entre la viscosidad las características de composición de la cerveza verde y la relación de la viscosidad con la temperatura.

La unidad de medida de la viscosidad es el Pa·s (SI) o el Poise (sistema cgs). La relación entre ambas es: 1mPa·s = 1cP.

Viscosidad en función de las características de la cerveza verde.

Se han tomado distintas muestras de cerveza verde de distintas características y se ha medido su viscosidad con un Reómetro rotacional de la marca "Haake Rheostress 1". El modo de operación es el siguiente: se controla la velocidad de cizalla sobre una muestra de cerveza y se mide el esfuerzo necesario para provocar esa velocidad de deformación.

La viscosidad se obtiene representando el esfuerzo de cizalla respecto a la velocidad de deformación. En todos los casos son líneas rectas que pasan por el origen, por tanto, el fluido se puede considerar Newtoniano. La viscosidad es la pendiente de dichas rectas.

Se realizan las mediciones a 4°C. Es la temperatura mínima a la que puede operar el reómetro con el que se trabaja.

Se desea observar si existe relación entre la viscosidad, la concentración de levaduras, el extracto real y el porcentaje volumétrico de alcohol.

Las mediciones de densidad, extracto real y porcentaje de alcohol se obtienen en un densímetro. La concentración de levaduras se determina mediante el método de contaje de levaduras, explicado en el *Anexo VI*.

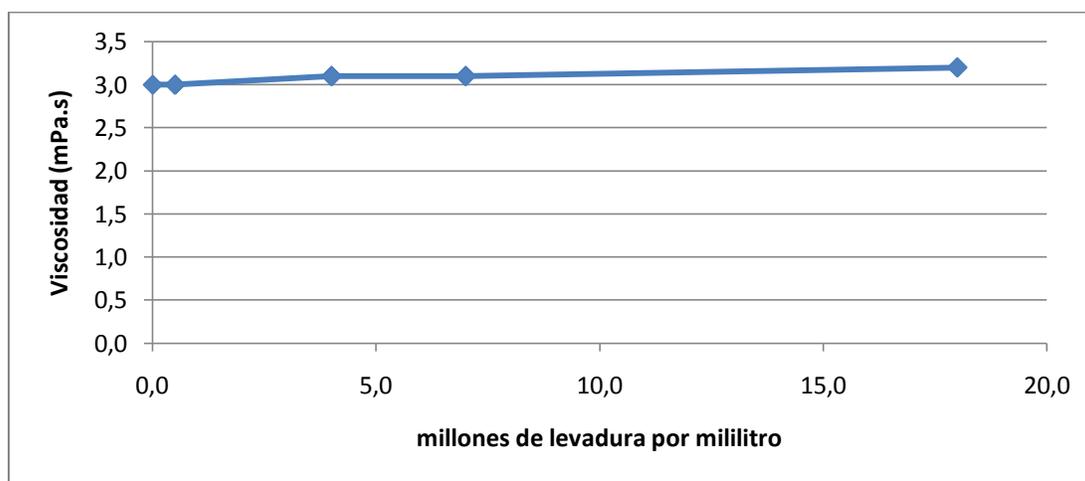
El extracto real es una medida utilizada en cervecería. La unidad en la que se mide es el *grado plato*. Una disolución de un grado plato tiene una densidad equivalente a una disolución formada por un gramo de sacarosa disuelta en 100 gramos de disolución. El extracto real da una idea de cómo se va desarrollando la fermentación: el mosto presentará un alto grado plato (gran concentración de azúcares). El grado plato de la cerveza disminuirá conforme avance la fermentación: la concentración de azúcares disminuye.

Los resultados que se obtienen son los siguientes:

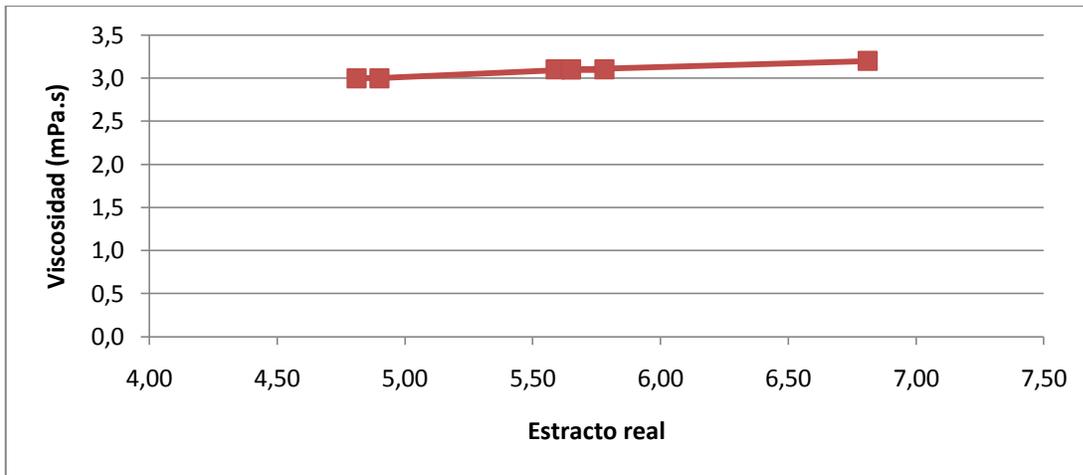
Tabla 3-4. Parámetros de la cerveza. Viscosidad 4°C.

T (°C)	mill lev/ml	Densidad (20°C)	Ereal	%EtOH	Viscosidad (mPa.s)
4	0,0	1,0073	4,81	7,06	3,0
4	0,5	1,0078	4,90	6,97	3,0
4	0,5	1,0078	4,90	6,97	3,0
4	4,0	1,0109	5,65	6,86	3,1
4	4,0	1,0109	5,65	6,86	3,1
4	4,0	1,0109	5,59	6,68	3,1
4	7,0	1,0118	5,78	6,56	3,1
4	7,0	1,0113	5,65	6,56	3,1
4	7,0	1,0113	5,65	6,56	3,1
4	18,0	1,0165	6,81	6,11	3,2
4	18,0	1,0165	6,81	6,11	3,2
20	5,2	1,0110	5,68	6,86	2,3
20	8,2	1,0116	5,81	6,80	2,3
20	8,0	1,0092	5,38	7,34	2,3

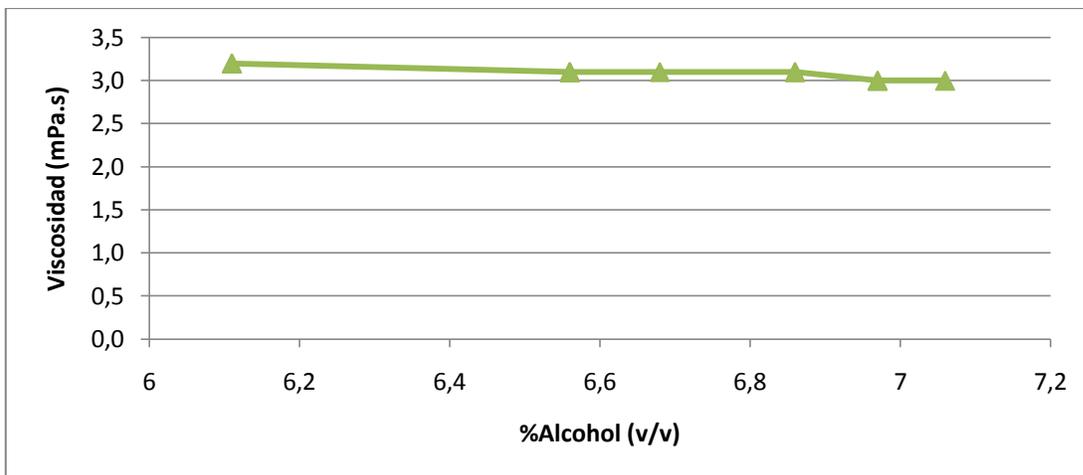
A continuación se representa gráficamente la influencia de los parámetros de la cerveza en la viscosidad.



Gráfica 3-1. Viscosidad vs. Millones de levadura por mililitro.



Gráfica 3-2. Viscosidad vs. Extracto real.



Gráfica 3-3. Viscosidad vs. %Alcohol (v/v)

Se observa una ligera tendencia de aumento de velocidad al aumentar la concentración de levaduras y el extracto real. La viscosidad disminuye ligeramente conforme disminuye el porcentaje volumétrico de alcohol de la muestra.

La viscosidad en todo el rango estudiado varía únicamente de 3 a 3,2 mPa·s. Por tanto, aunque exista una tendencia que relaciona viscosidad y los parámetros de la cerveza verde, ésta no se considerará relevante a la hora de analizar las filtraciones.

Variación de la viscosidad con la temperatura.

La mayoría de los materiales disminuyen su viscosidad con la temperatura; la dependencia es exponencial y puede haber variaciones de hasta un 10% por cada °C modificado. Cuanto más viscoso es el líquido esta dependencia es mayor.

Henry Eyring (1936) afirmó que es posible modelar la relación entre viscosidad y temperatura utilizando la ecuación de Arrhenius. Eyring considera la viscosidad como un proceso térmico en el que las moléculas deben sobrepasar una barrera de energía para desplazarse a un sitio adyacente; el modelo que describió es llamado "modelo de la barrera de energía de activación de flujo"⁶.

Se considera que la variación de la viscosidad respecto a la temperatura viene dada por la ecuación de Arrhenius

$$\log\left(\frac{\mu}{\mu_0}\right) = E_A \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)$$

Donde E_A es la energía de activación de flujo. T es la temperatura en grados kelvin y μ es la viscosidad.

Se realizan mediciones de viscosidad a 20°C con el reómetro rotacional del que se dispone. Los resultados se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 3-5. Parámetros de la cerveza. Viscosidad. 20°C.

T (°C)	mill lev/ml	Densidad (20°C)	Ereal	%Ohvol	Viscosidad (mPa.s)
20	5,19	1,011	5,68	6,86	2,3
20	8,2	1,01157	5,81	6,8	2,3
20	8	1,00921	5,38	7,34	2,3

Se observa, comparando las tablas 3-5 y 3-6 que la viscosidad de la cerveza disminuye al aumentar la temperatura.

Se halla la energía de activación mediante la ecuación de Arrhenius. Para ello se toma como referencia los valores de viscosidad a 4°C en el rango de concentración de levaduras al que se suele filtrar (de 5 a 10 millones/ml).

$$E_A = \frac{\log\left(\frac{2,3}{3,1}\right)}{\left(\frac{1}{20 + 273} - \frac{1}{4 + 273}\right)} = 657,6 \text{ kJ/mol}$$

Con este dato de energía de activación y aplicando la ecuación de Arrhenius, se puede calcular la variación de la viscosidad con la temperatura en el rango de temperaturas en el que trabajamos.

⁶ Determinación de la energía de activación de flujo en ligantes asfálticos. Delman Salomón. Huachun Zhai Cui.2003.

Tabla 3-6. Variación de la viscosidad con la temperatura.

T(K)	T (°C)	Viscosidad
272	-1	3,4
273	0	3,4
274	1	3,3
277	4	3,1
293	20	2,3

Se considerará que la viscosidad de la cerveza no varía con la temperatura en el rango de temperaturas en el que trabajamos, tomando como valor de referencia 3,4mPa·s.

3.3.2 Permeabilidad.

La permeabilidad del lecho filtrante debería mantenerse constante en condiciones óptimas. Es lo que se pretende al añadir a la cerveza verde que entra en el filtro los coadyuvantes de filtración. Si se consiguiese mantener la permeabilidad constante, la diferencia de presión en el filtro deberá aumentar de manera lineal con respecto al volumen filtrado.

El parámetro más influyente en la pérdida de permeabilidad es la concentración de levaduras existente en la cerveza verde. Se observa experimentalmente que en los momentos en los que hay golpes de levadura (que se dan sobre todo cuando se comienza a filtrar un nuevo tanque de fermentación) la presión a la entrada del filtro aumenta de forma mucho más acusada. Así mismo, una alta concentración de levaduras en la cerveza verde conlleva un ciclo de filtración más corto, debido a que el filtro se satura antes.

Se desea evitar esas pérdidas de permeabilidad para que el ciclo de filtración sea lo más largo posible. Para ello se ha definido un coeficiente, que a lo largo del presente proyecto se denominará **ratio de sólidos**.

El ratio de sólidos se define como:
$$\frac{K_{galuvionado}}{K_{levadura}}$$

Se pretende optimizar el sistema encontrando el ratio de sólidos adecuado para que el aumento de diferencia de presión (ΔP) sea mínimo en el transcurso de la filtración.

3.3.3 Área y espesor del lecho.

En el sistema que se estudia, los coadyuvantes de filtración junto con los sólidos que se quedan retenidos en el sistema, forman la torta de filtración sobre las candelas cilíndricas. Esta torta de

sólidos aumenta conforme avanza la filtración. En cada filtración analizada se calcula el área y el espesor formado tanto por la cantidad de coadyuvantes de filtración como por las levaduras que quedan retenidas en el filtro.

El método para calcular cómo aumenta el área y el espesor del lecho es análogo al explicado en el apartado "3.3. Dimensionado del filtro y precapa de filtración" para el cálculo del volumen de la precapa.

La limitación de volumen en el filtro es un dato a tener en cuenta ya que si se ocupa todo el volumen libre puede haber problemas a la hora de limpiar el filtro.

El volumen máximo que puede ocupar la torta de filtración del aluvionado junto con la materia sólida que posee la cerveza verde⁷ es de 1,1975m³.

En cada filtración analizada se calcula la disminución de este volumen por hectolitro filtrado.

3.4 Comportamiento del sistema bajo las condiciones actuales de operación.

Actualmente el método de formación de la precapa y de adición de aluvionado al filtro es el mismo en todos los ciclos de filtración, independientemente de las características que tenga la cerveza verde que se filtre.

3.4.1 Modo de operación actual. Aluvionado.

Al comienzo de la filtración se llena el tanque de aluvionado con agua y un total de 60 Kg de tierras diatomeas. La suspensión ocupa un volumen de 1320 litros. Las tierras que se utilizan son: 40 Kg de Clarcel CBR® y 20 Kg de Clarcel CBL3®. Conforme transcurre el tiempo, el volumen del tanque de aluvionado disminuye a una velocidad media de 610 l/h. Cuando el volumen del tanque de aluvionado es inferior a 500 litros se añaden 20 Kg de CBR® y se rellena el tanque hasta alcanzar el volumen máximo: 1320 litros.

Este modo de operación hace que se inyecten en el filtro una cantidad de tierras que se mueve en el rango de 89 a 145 gramos de tierra por hectolitro de cerveza filtrada. Inicialmente se introducen 145g/Hl. Conforme avanza el ciclo de filtración los kilos de tierra introducidos por hectolitro filtrado disminuyen. Esto es debido a que la concentración de la suspensión de tierras en el tanque de aluvionado es cada vez menor.

⁷Calculado en el apartado 3.1.

El caudal de salida de la suspensión de aluvionado hacia el filtro depende de dos bombas de membrana. Las bombas de membrana impulsan el fluido desde la parte inferior del tanque de aluvionado hasta la tubería que dirige la cerveza verde hasta el filtro.

La cantidad de tierras que se introducen al filtro dependen tanto de la concentración de la suspensión en el tanque de aluvionado como del caudal que proporcionan las bombas de membrana.

El aluvionado forma una torta de filtración permeable que posibilita mantener un caudal de fluido constante al mismo tiempo que retiene las partículas sólidas por tamizado y adsorción. Cuanto más profunda sea la torta más posibilidades hay de que las partículas sólidas presentes en la cerveza de diámetro menor que el diámetro hidráulico queden retenidas en la torta.

3.4.2 Ciclo de filtración

La cerveza filtrada se dirige hacia tanques o cisternas de almacenamiento. Esta cerveza filtrada y almacenada servirá para llenar barriles, latas o botellas. Antes de su venta y distribución, la cerveza se pasteurizará.

En las siguientes páginas se habla de dos conceptos diferentes que no se deben confundir:

Un ciclo de filtración hace referencia al ciclo del filtro: desde que se hace la precapa hasta que se vacía el filtro de coadyuvantes y se limpia. En un ciclo de filtración se llenan varios tanques o cisternas.

Un lote de filtración hace referencia a un volumen de cerveza filtrada dentro del ciclo. Este volumen corresponde al volumen del tanque de almacenamiento de cerveza filtrada, son aproximadamente 300HI.

Para realizar el estudio del sistema de filtración, en primer lugar se realiza un histórico de filtraciones. Esto consiste en analizar la cerveza antes de ser filtrada y durante la filtración; también se toman datos del aumento de presión con el tiempo, del caudal de salida, de la temperatura a la entrada del filtro y del volumen total filtrado.

Posteriormente se tuvo la necesidad de saber la cantidad de tierras que entraban al filtro en cada momento. Por ello se comenzaron a tomar datos adicionales de los kilos de tierras que se vertían en el tanque de aluvionado y el volumen del tanque de aluvionado con el tiempo.

El caudal de entrada de cerveza al filtro es una variable controlable. Se regula mediante una bomba hidráulica. Ésta impulsa la cerveza desde el tanque de fermentación al filtro. Se controla también la temperatura del fluido a la entrada al filtro, si ésta supera los 2°C se activa un enfriador de placas.

Las características de la cerveza verde que se filtra no son controlables en la etapa de filtración. El análisis de cerveza verde se debe realizar antes de filtrar. De un día para otro los parámetros pueden variar. También es frecuente que la concentración de sólidos en suspensión de la cerveza verde varíe desde la parte inferior del tanque de fermentación hasta la parte superior del tanque. Estas variaciones en las características del fluido a filtrar dificultan el estudio del filtro.

Se pretenden realizar filtraciones a caudal constante con un aumento progresivo y mínimo de la presión.

Experimentalmente se obtiene en la mayoría de los casos una variación lineal del aumento de diferencia de presión en el filtro (entrada-salida) conforme aumenta el volumen de cerveza filtrada. Se observa que al modificar las condiciones de operación (concentración de levaduras, caudal, cantidad de aluvionado, etc.) la pendiente de la recta ΔP vs. HI_{filtrado} varía.

Para poder explicar de forma breve las conclusiones derivadas del análisis de los datos estudiados, se exponen dos casos extremos que pretenden ilustrar el análisis realizado para cada filtración.

En el primer caso las condiciones de operación se mantienen prácticamente constantes a lo largo del tiempo. En el segundo caso, se producen varios cambios a lo largo del proceso.

3.4.3 Condiciones de operación constantes.

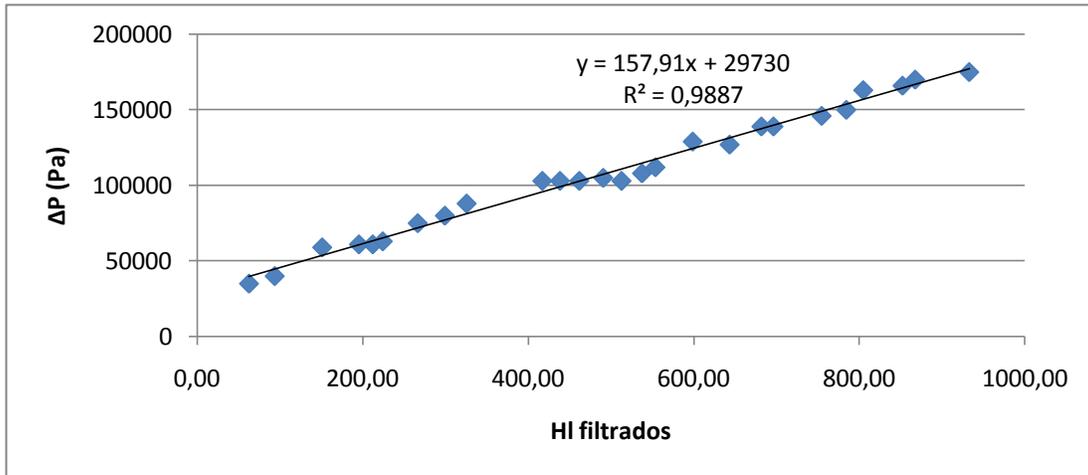
Se filtra cerveza tipo "A", madurada en el tanque vertical de fermentación "O". La velocidad de filtración es constante e igual a 180 HI/h.

El análisis de la primera muestra de cerveza tomada dio como resultado una concentración de levaduras de 7 millones por mililitro. Los posteriores análisis dieron un valor constante de 6 millones de levaduras por mililitro.

El ciclo de filtración termina debido a la planificación de la producción de la fábrica. En ese momento la diferencia de presión entre la entrada y la salida del filtro era de $2,2 \cdot 10^5$ Pascales. Los hectolitros totales de cerveza verde filtrados fueron 1120.

VARIACIÓN DE LA PRESIÓN EN FUNCIÓN DEL VOLUMEN FILTRADO.

La evolución de la diferencia de presión entre la entrada y a la salida del filtro con respecto a los hectolitros filtrados se desarrolla como muestra la siguiente gráfica.



Gráfica 3-4. Operación actual. Condiciones constantes. Evolución de la presión respecto a los hectolitros filtrados.

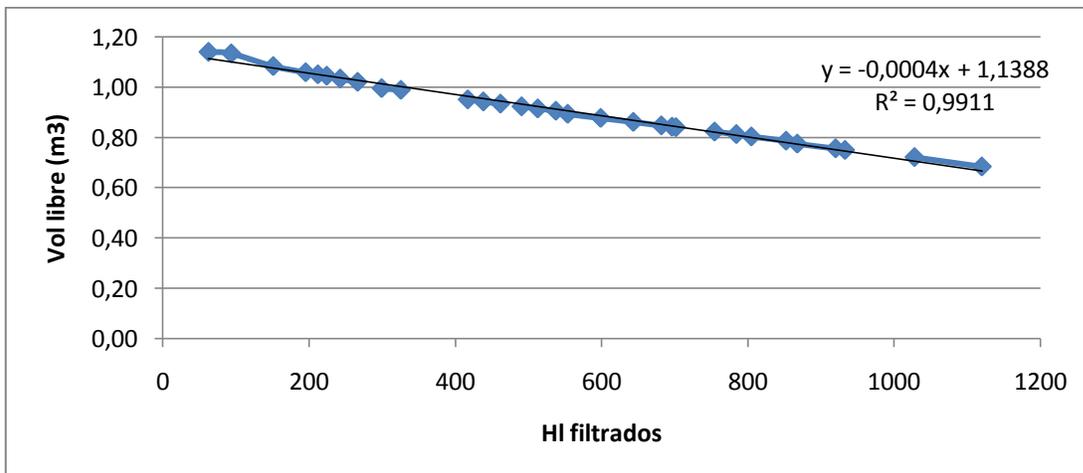
Se observa un aumento de la presión lineal respecto al volumen filtrado.

Suponiendo que se sigue la misma tendencia, al alcanzar la diferencia de presión máxima de $4 \cdot 10^5$ Pascales se hubiesen filtrado 2344 HI.

EVOLUCIÓN DEL VOLUMEN OCUPADO DENTRO DEL FILTRO

El volumen máximo que puede ocupar la torta de filtración del aluvionado junto con la materia sólida que posee la cerveza verde⁸ es de $1,975 \text{ m}^3$.

Las diatomeas y las levaduras van ocupando el volumen libre conforme se filtra la cerveza verde de la siguiente manera:



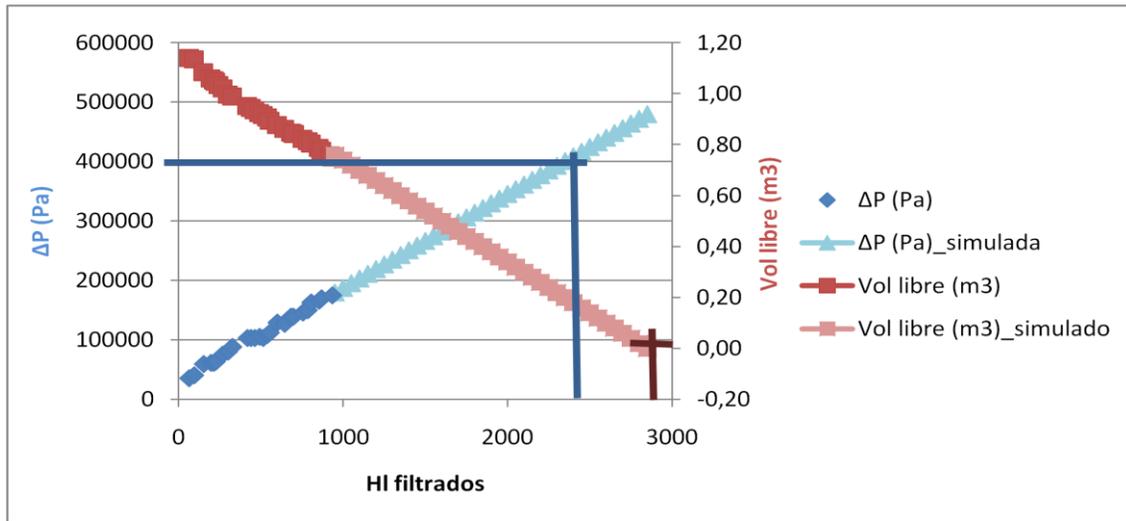
Gráfica 3-5. Operación actual. Condiciones constantes. Evolución del de volumen libre dentro del filtro respecto a los hectolitros filtrados.

⁸ Calculado en el apartado "3.3. Dimensionamiento del filtro y precapa de filtración"

El volumen libre disminuye de manera lineal conforme el ciclo de filtración avanza.

Si las condiciones de operación no varían, es de esperar que se siga la misma tendencia. El filtro se llenaría al 90% de su capacidad (1,1975 m³) si se filtran 2850 HI.

Analizando el aumento de presión y el volumen libre de manera conjunta se obtiene:



Gráfica 3-6. Operación actual. Condiciones constantes. Saturación del filtro.

Si se hubiese seguido filtrando, bajo las mismas condiciones y con un fluido de características similares, el ciclo de filtración terminaría teóricamente debido a que se alcanza la presión máxima permitida en el filtro. En este momento quedaría espacio libre en el filtro. Se hubiesen filtrado 2344 HI de cerveza en 13 horas de funcionamiento continuo.

RATIO DE SÓLIDOS

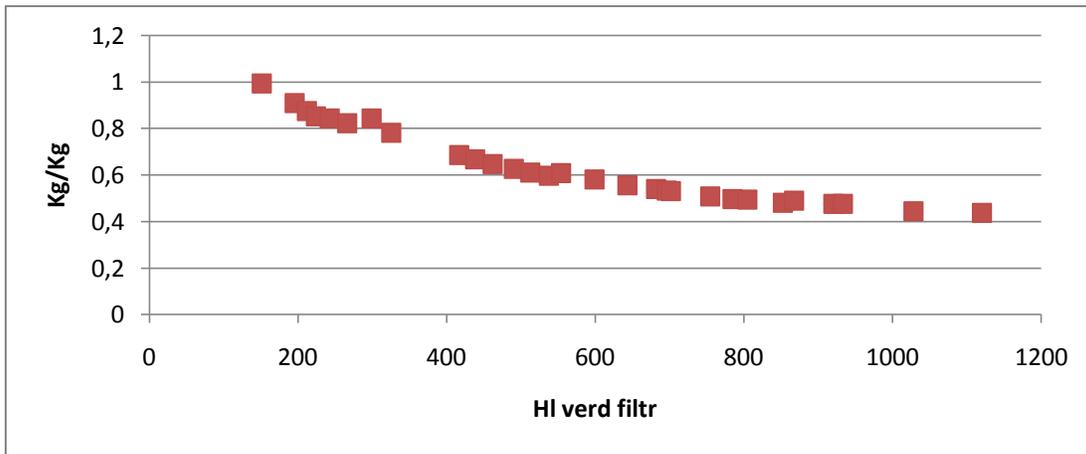
En este caso la concentración de levadura en el tanque de fermentación del que se extrae es muy homogénea, por tanto, los kilos de levadura por hectolitro filtrado se mantienen constantes a lo largo del ciclo.

Por el contrario, los kilos de aluvionado que se introducen en el filtro disminuyen conforme avanza el ciclo de filtración⁹.

El ratio de sólidos, definido como: $\frac{Kg_{aluvionado}}{Kg_{levadura}}$, da una idea de la permeabilidad.

⁹ El modo de operación viene detallado al inicio del apartado "3.4.1. Modo de operación actual. Aluvionado"

En este caso evoluciona como se muestra en la gráfica.

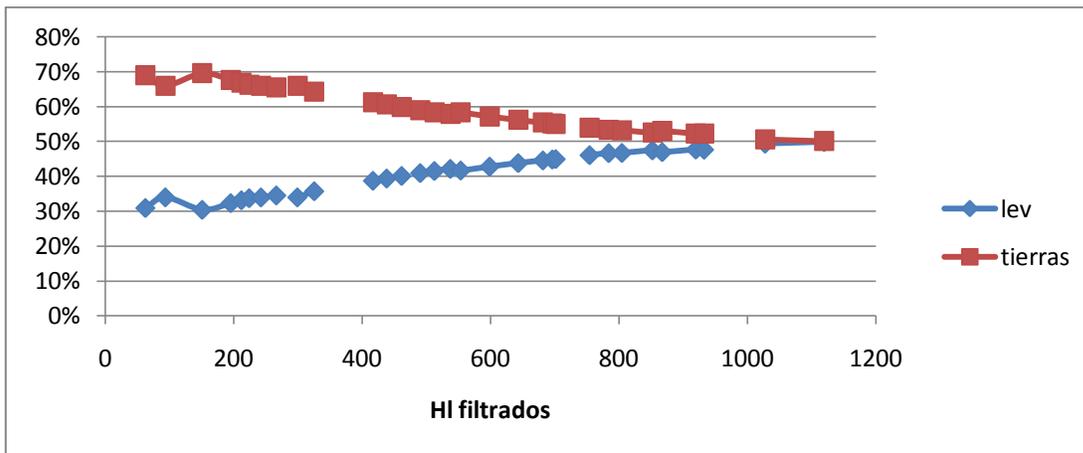


Gráfica 3-7. Operación actual. Condiciones constantes. Evolución del ratio de sólidos respecto al volumen filtrado.

El ratio de sólidos disminuye conforme avanza el ciclo de filtración.

La disminución del ratio de filtración supone la disminución de ayuda filtrante por kilo de levadura.

El porcentaje volumétrico de las diatomeas y de la levadura en el interior del filtro evoluciona con los hectolitros filtrados como muestra la siguiente gráfica.



Gráfica 3-8. Operación actual. Condiciones constantes. Evolución del porcentaje de tierras y levaduras respecto a los hectolitros filtrados.

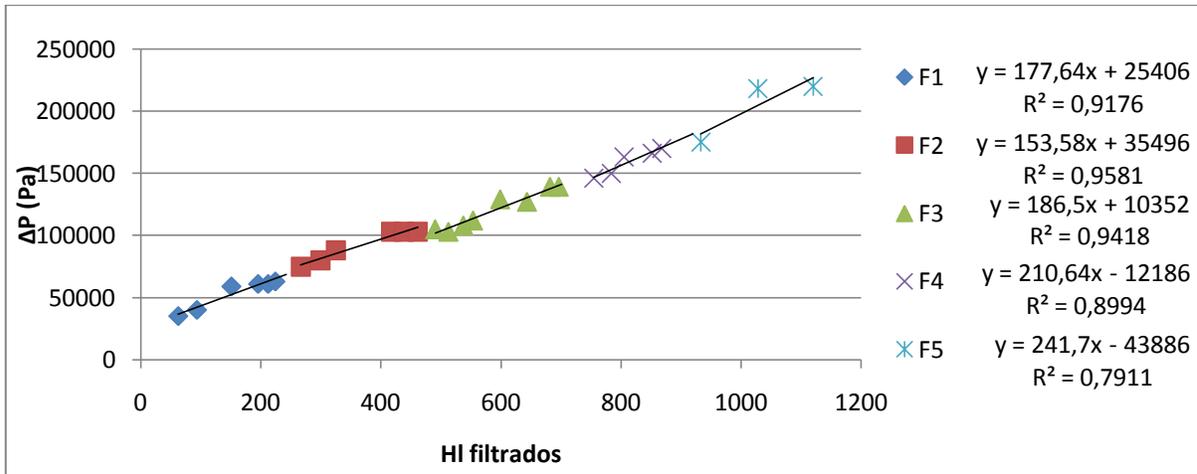
Se observa que la cantidad de tierras en las nuevas capas formadas alrededor del filtro son cada vez más ricas en levaduras.

La disminución del ratio de filtración (Kg aluvionado/Kg levadura) puede dar lugar a que en algunos puntos las levaduras cieguen canales de paso del fluido y, por tanto, se disminuya la

permeabilidad. La disminución de la permeabilidad tiene una repercusión directa en el aumento de la presión según la ecuación de Darcy.

Una menor permeabilidad significa un aumento más rápido de la diferencia de presión, es decir, la pendiente resultante de la representación ΔP vs. $HI_{\text{filtrados}}$ es más acusada.

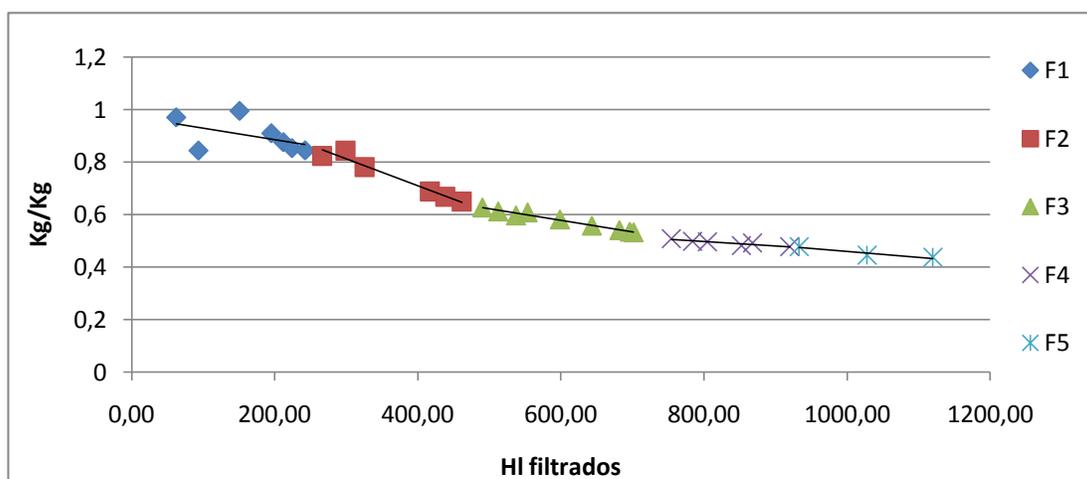
Si se segmenta el ciclo de filtración por filtraciones o por lotes se puede observar con detalle la variación en la pendiente de filtración conforme avanza el ciclo.



Gráfica 3-9. Operación actual. Condiciones constantes. Evolución de la presión con el volumen filtrado. Tramos.

Se realizan cinco filtraciones. En F1 (la primera filtración) se considera que el filtro se está estabilizando. En las siguientes filtraciones se observa que la pendiente aumenta paulatinamente de una filtración a la siguiente. A priori se considera la pendiente óptima de filtración la que tenga un valor numérico menor ya que hará que se filtren más hectolitros en el ciclo de filtración. La pendiente óptima es 153,50 Pa/HI.

En la siguiente gráfica se muestra cómo disminuye el ratio de filtración por hectolitro filtrado para cada filtración particular.



Gráfica 3-10. Operación actual. Condiciones constantes. Evolución del ratio de sólidos (Kgaluv/Kglev) en función de los hectolitros filtrados.

La pendiente óptima de filtración en este ciclo corresponde a F2. Ha sido hallada en la gráfica 4-10, y tiene el valor de 153,58 Pa/HL. El ratio de sólidos que corresponde a esa pendiente de filtración es el **ratio óptimo de sólidos** y corresponde al rango de valores que va de **0,84-0,65 Kg aluvionado/kg levadura**.

3.4.4 Variación en las condiciones de operación.

En este ejemplo varían algunos parámetros que en el ejemplo anterior permanecen constantes. Los parámetros que varían son concentración de levaduras y caudal de entrada al filtro.

El tipo de cerveza es "A". Se filtra cerveza proveniente del tanque de fermentación "O". Éste se agota y se empieza a filtrar el Tanque de fermentación P.

Normalmente en los comienzos de tanques de cerveza a filtrar se observan golpes de levadura. Los golpes de levadura son momentos puntuales en los que la concentración de levadura se aumenta en factores de 10 a 100.

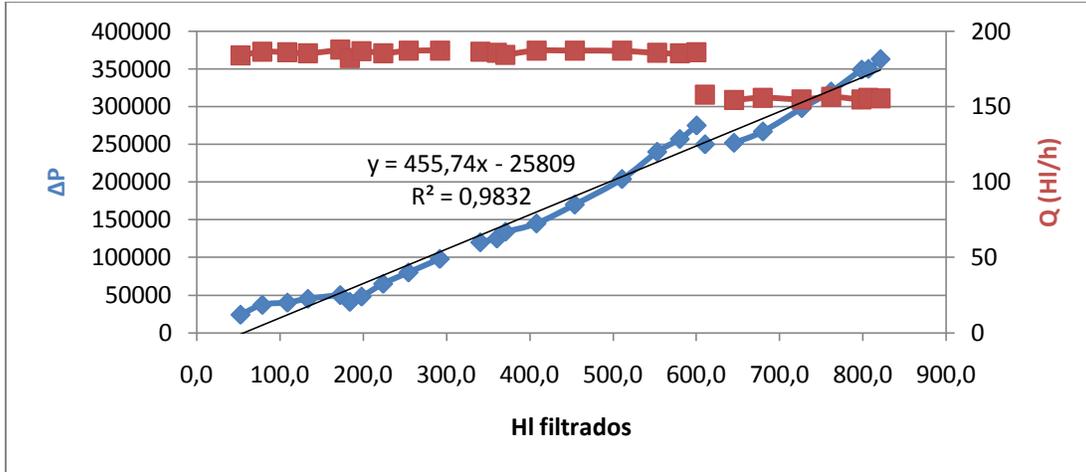
La concentración de levaduras es de 6 millones/ml en el tanque O. Al cambiar el tanque se observa un pico de hasta 17 millones/ml; posteriormente se estabiliza la concentración de levaduras en 9 millones/ml.

La consigna de velocidad se mantiene en las primeras filtraciones en 180 HL/h, en la última filtración (a los 610 hectolitros filtrados) se disminuye la velocidad a 150 HL/h.

En total se filtran 820 hectolitros de cerveza, alcanzando una diferencia de presión al final del ciclo de filtración de $3,6 \cdot 10^5$ Pa. El ciclo de filtración se considera agotado.

VARIACIÓN DE LA PRESIÓN EN FUNCIÓN DEL VOLUMEN FILTRADO.

Representando la evolución de la diferencia de presión respecto a los hectolitros filtrados se obtiene:



Gráfica 3-11. Operación actual. Condiciones variables. Evolución presión vs. HI filtrados.

En este caso se pueden diferenciar claramente dos cambios bruscos de pendiente. Estos cambios de pendiente corresponden con las variaciones en la filtración.

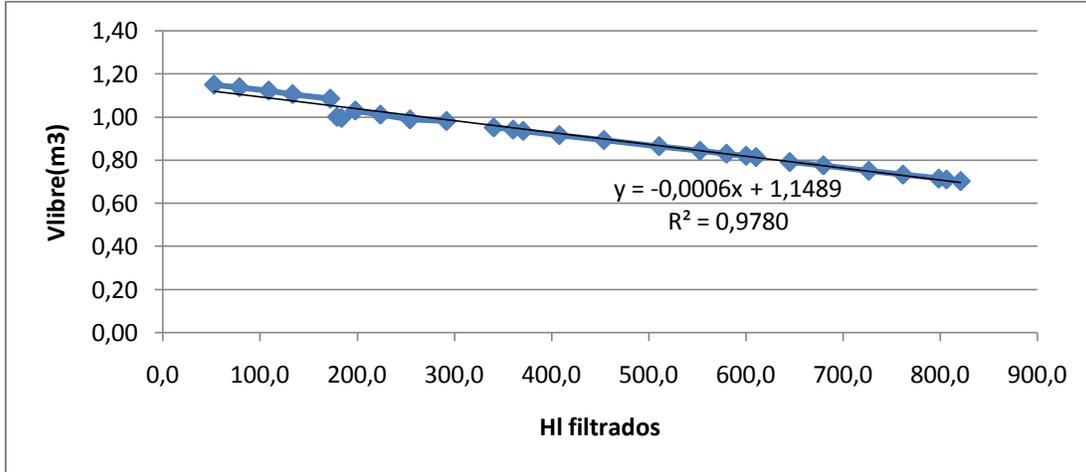
El primer cambio de pendiente se observa a los 180 hectolitros. Es debido al golpe de levaduras que se produce al empezar un tanque de cerveza verde.

El segundo cambio brusco en la pendiente de filtración se da a los 610 hectolitros debido a la disminución de la velocidad de filtración.

El ciclo de filtración se considera agotado. En el caso de que se hubiese continuado con la filtración se habrían podido filtrar 84 hectolitros más. Es más conveniente limpiar el filtro y hacer una nueva precapa para continuar filtrando. Si se disminuye la velocidad de filtración aunque aumente el tiempo que es posible filtrar, retrasaría la producción.

EVOLUCIÓN DEL VOLUMEN OCUPADO DENTRO DEL FILTRO

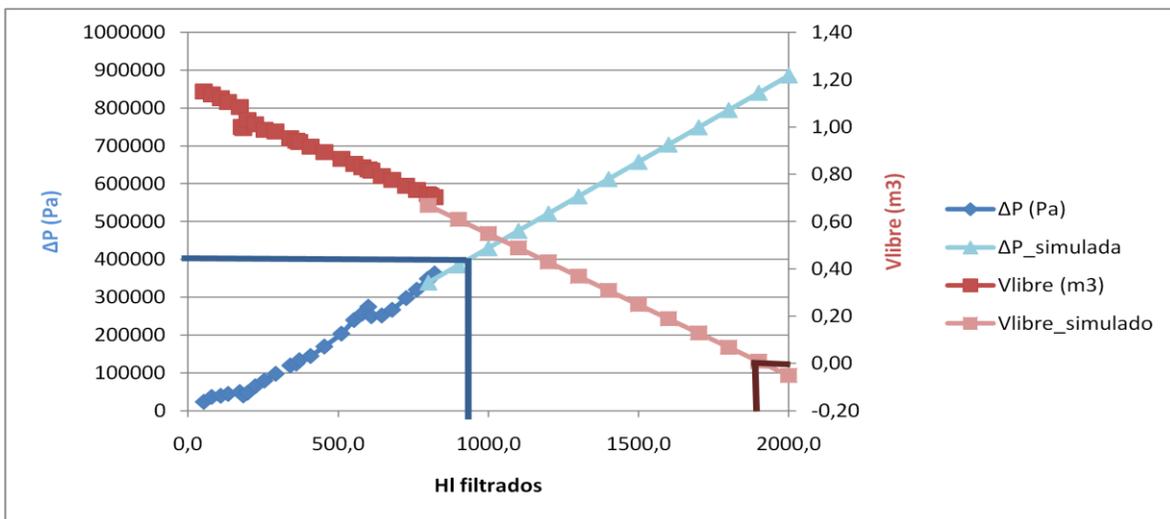
El volumen libre dentro del filtro disminuye de forma lineal de la siguiente manera.



Gráfica 3-12. Condiciones variables. Evolución del volumen libre respecto a los hectolitros filtrados.

Si las condiciones de operación se mantienen constantes la evolución del ciclo de filtración seguiría la misma tendencia. El filtro se llenaría al 90% de su capacidad si se filtran 1915HI.

Observando la variación de presión y de volumen respecto a los hectolitros filtrados de manera conjunta se determina que de nuevo el ciclo de filtración finaliza por falta de permeabilidad, no por falta de espacio en el filtro.

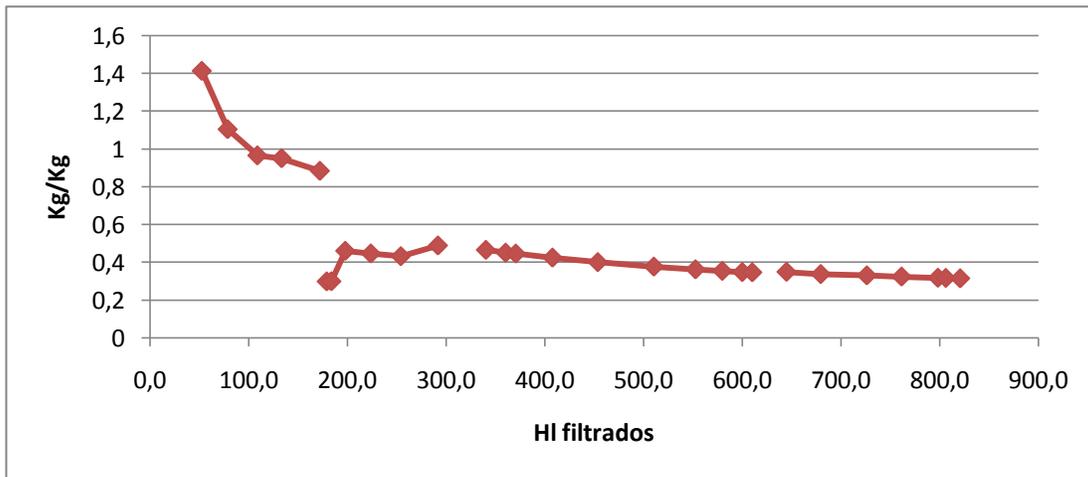


Gráfica 3-13. Operación actual. Condiciones variables. Agotamiento del filtro.

El filtro todavía tendría mucho espacio disponible para alojar torta de filtración y partículas sólidas filtradas.

RATIO DE SÓLIDOS

En este caso la concentración de ayuda filtrante que se introducen en el filtro varía exactamente igual que en el ejemplo anterior. Sin embargo, la concentración de levaduras varía al avanzar el ciclo de filtración.



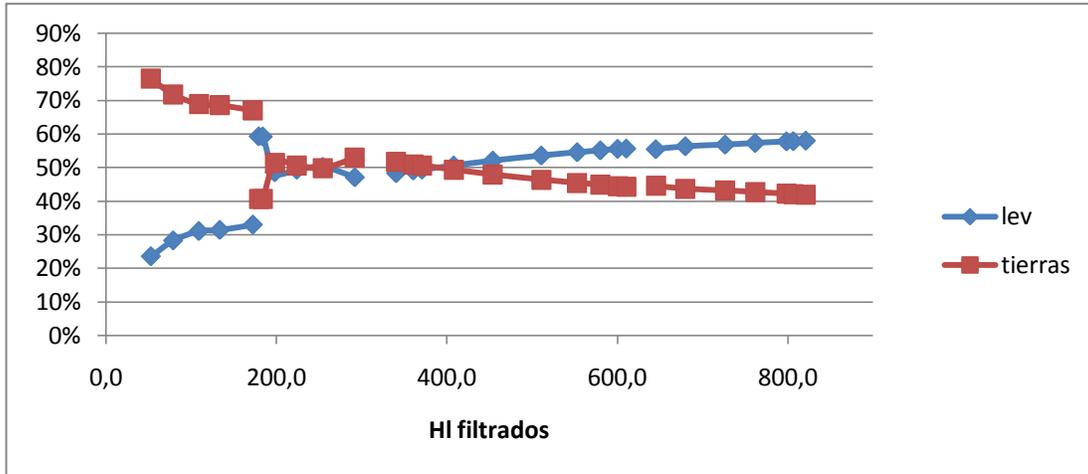
Gráfica 3-14. Operación actual. Condiciones variables. Ratio de sólidos vs. HI filtrados.

Se observan tres tramos:

El primero corresponde a la menor concentración de levaduras y al mayor ratio de tierras. El segundo tramo corresponde al golpe de levaduras: Inicio del tanque P. El tercer tramo corresponde con una concentración de levaduras de 9 millones/ml.

Nos encontramos muy lejos del ratio de filtración de 0,64-0,85 Kg/Kg determinado como óptimo en el caso anterior.

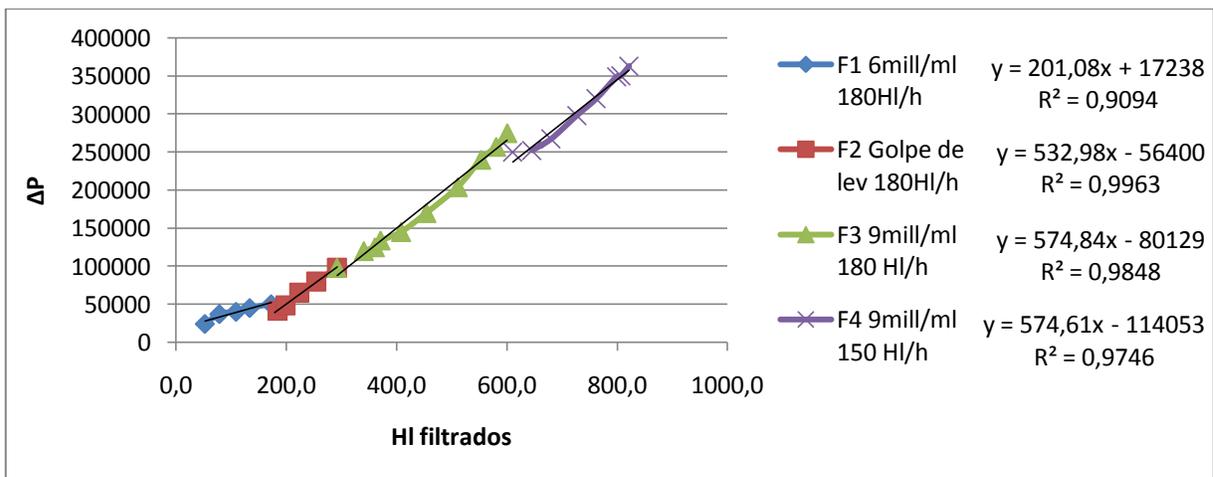
El porcentaje volumétrico de tierras y de levaduras en el filtro varía, con respecto a los hectolitros filtrados, de la siguiente manera.



Gráfica 3-15. Operación actual. Condiciones variables. Composición de la torta de filtración vs. HI filtrados.

Se observa que a partir de los 400 hectolitros filtrados, en el filtro hay un porcentaje en volumen mayor de levaduras que de aluvionado. Con una torta de filtración formada mayoritariamente por levaduras la permeabilidad será cada vez menor.

A continuación se representa la variación de presión respecto a los hectolitros filtrados en varios tramos según las variaciones sufridas.



3-16. Operación actual. Condiciones variables. Composición de la torta de filtración vs. HI filtrados.

Se observa cómo el golpe de levaduras en el segundo tramo hace que la pendiente aumente de forma brusca. Esta pérdida de permeabilidad es irreversible.

Hay que remarcar que una disminución de la velocidad de filtración provoca una disminución inmediata en la variación de presión respecto al volumen que se filtra, sin embargo, la pendiente de ΔP vs. HI filtrados permanece prácticamente constante.

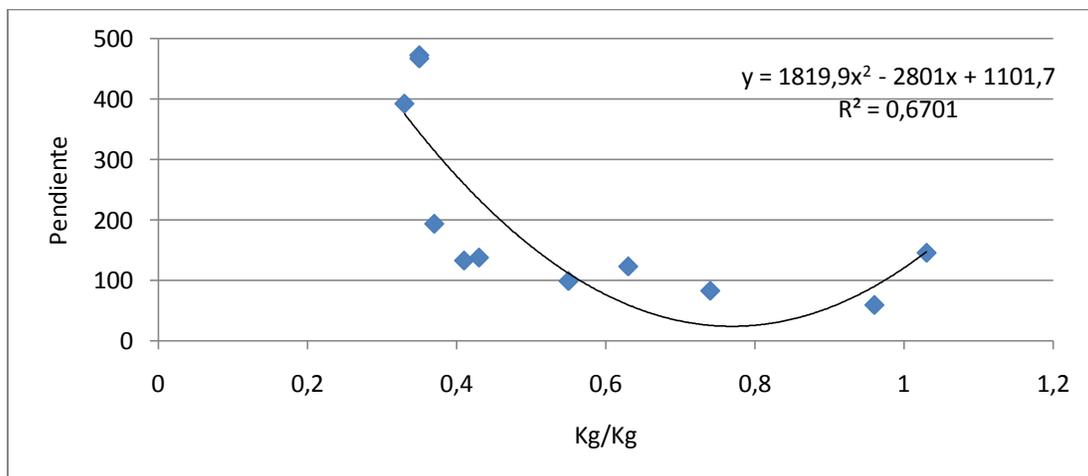
3.4.5 Conclusiones obtenidas. Funcionamiento actual del filtro.

De los resultados experimentales se puede concluir que la influencia más directa en la trayectoria de la filtración la marca la pérdida de permeabilidad de la torta filtrante.

La **permeabilidad de la torta de filtración** no es un parámetro calculable fácilmente. Se considera que la pérdida de permeabilidad está directamente relacionada con la relación ayuda filtrante – levaduras. Por ello se define el ratio de filtración:

$$\text{ratio de filtración} = \frac{\text{Kg aluvionado}}{\text{Kg levadura}}$$

Para hallar el ratio de filtración óptimo se relacionan las pendientes obtenidas en las distintas filtraciones estudiadas, con el ratio de sólidos de cada filtración. La relación es la siguiente:



Gráfica 3-17. Operación actual. Relación entre las pendientes de filtración y el ratio de sólidos.

El mínimo de la función de segundo grado que relaciona las pendientes de filtración con el ratio de sólidos es 0,8. Esto corresponde a una torta de filtración formada por un volumen de 64% de tierras y 36% de levaduras. Este porcentaje volumétrico de torta filtrante entra dentro del rango recomendado por la European Brewery Convention (EBC¹⁰).

Se observa que la **velocidad de filtración** influye directamente en la diferencia de presión existente entre la entrada y la salida del filtro. Sin embargo, la pendiente de filtración que se obtiene tras disminuir el caudal de filtración, manteniendo el resto de parámetros constantes, es la misma.

3.5 Optimización del sistema actual

En la optimización del sistema actual de filtración se mantendrá constante el ratio de filtración (Kgtierras/Kglevaduras) para que la permeabilidad se mantenga constante. Para ello se analiza la cerveza verde antes de que ésta entre al filtro. En función de la concentración de levaduras se calcula la cantidad de tierras necesarias en el tanque de aluvionado. Tras preparar la suspensión de ayuda filtrante requerida, se empieza a operar. Cada 250Hl se toma otra muestra de cerveza para realizar las correcciones necesarias en el tanque de aluvionado (añadir agua o tierras). Se intenta conseguir un ratio con un valor en torno a 0,8 Kgaluvionado/Kglevadura.

3.5.1 Resultados

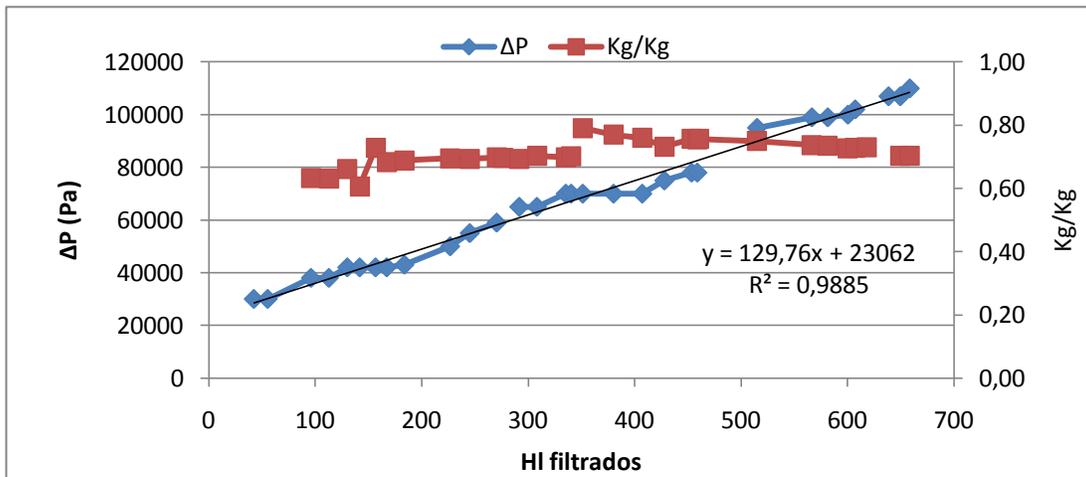
Se filtró cerveza tipo "A" a una velocidad constante igual a 180 hectolitros/h. La concentración de levaduras es de 4 millones/ml durante todo el ciclo de filtración.

El ciclo de filtración finaliza debido a la planificación de producción. La diferencia de presión entre la entrada y la salida al término del ciclo de filtración es de $1,1 \cdot 10^5$ Pa.

VARIACIÓN DE LA PRESIÓN EN FUNCIÓN DEL VOLUMEN FILTRADO.

En la siguiente gráfica se muestra tanto la evolución de la diferencia de presión como del ratio kgaluvionado/Kglevadura respecto a los hectolitros filtrados.

¹⁰ Ver apartado "2.2.1.2. Aluvionado"



Gráfica 3-18. Optimización. Evolución de la presión y del ratio de filtración vs. HI filtrados.

La pendiente de filtración es de 130 Pa/HI. La presión aumenta de forma bastante lineal. Sin embargo, al mantener el ratio de sólidos constante se esperaba una linealidad mayor.

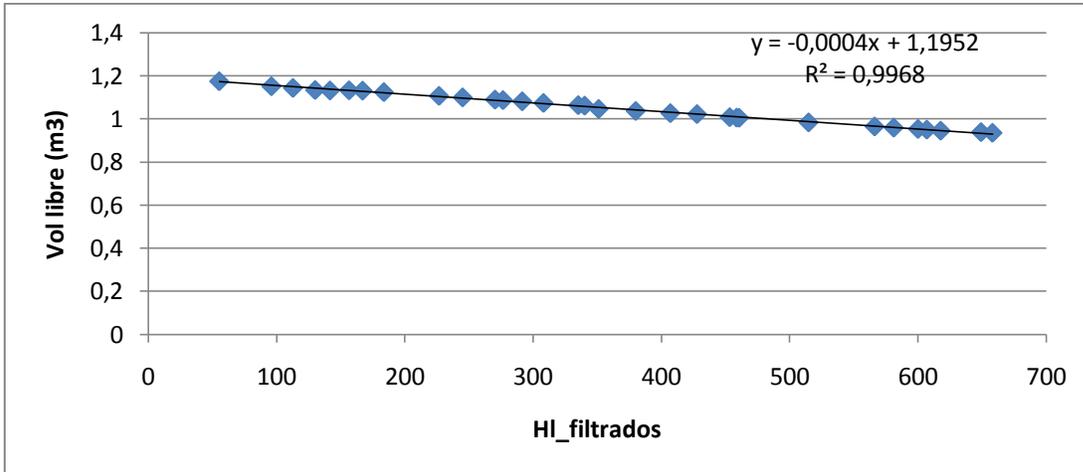
Para el modo de operación actual y filtrando la cerveza tipo "A", se han analizado 2 filtraciones con una concentración de 5 millones de levadura por mililitro. Las pendientes de filtración fueron 238 y 252 Pa/HI.

Era de esperar que la pendiente de filtración fuese similar a las obtenidas hasta ahora, ya que al existir únicamente una receta de tierras, el modo de operación se encuentra sobredimensionado para aquellas cervezas con baja concentración de levaduras. Sin embargo se observa una disminución de la pendiente de filtración para este modo óptimo de operación.

La disminución de pendiente de filtración permite realizar ciclos de filtración más largos. Esto conlleva un ahorro tanto en cantidad de precapa como en tiempo (limpieza del filtro y preparación de la precapa).

EVOLUCIÓN DEL VOLUMEN OCUPADO DENTRO DEL FILTRO

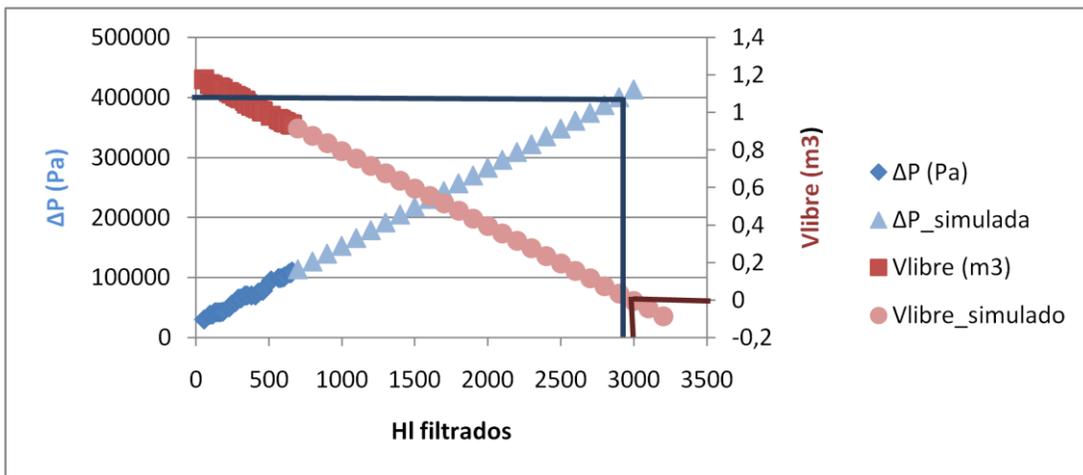
El volumen libre dentro del filtro disminuye de forma lineal de la siguiente manera.



Gráfica 3-19. Optimización. Evolución del volumen libre dentro del filtro.

La evolución del volumen libre dentro del filtro es muy similar al comportamiento actual del filtro.

Si el sistema sigue la misma tendencia que hasta el momento, manteniendo las condiciones de operación constantes, se daría la situación que se muestra a continuación:



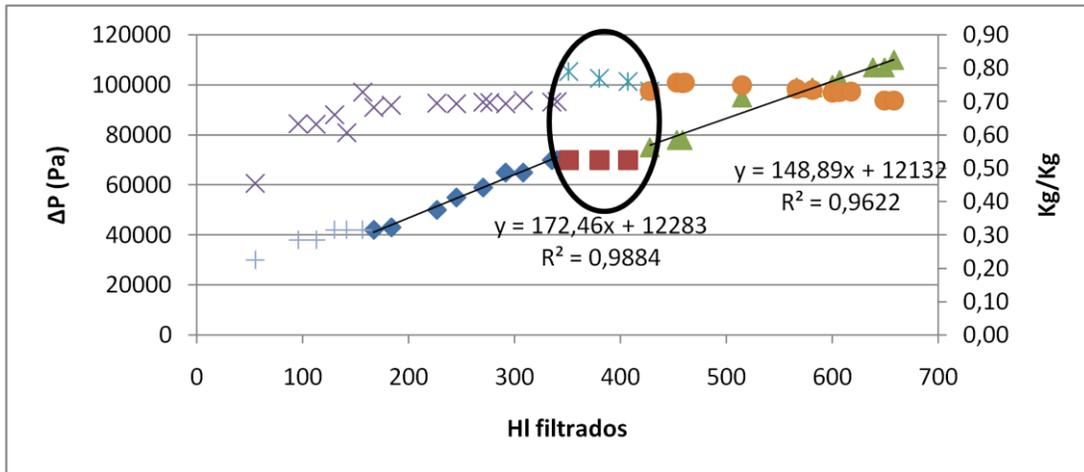
Gráfica 3-20. Optimización. Saturación del filtro.

Se observa que la finalización del ciclo de filtración se daría prácticamente en el mismo momento debido a la falta de permeabilidad y a la falta del espacio disponible. Se consigue un funcionamiento óptimo del filtro.

RATIO DE SÓLIDOS

Se ha intentado mantener el ratio de sólidos constante en todo momento. Sin embargo existen pequeñas variaciones.

Estas variaciones permiten observar la relación tan estrecha que existe entre el ratio de sólidos y el aumento de presión en el interior del filtro.



Gráfica 3-21. Optimización. Ratio de sólidos vs. HI filtrados

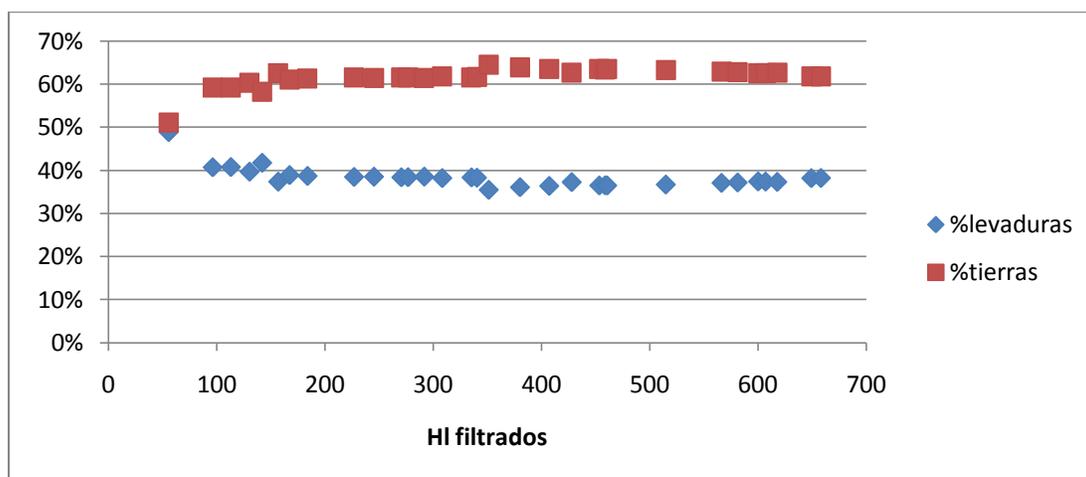
En la gráfica se observa que el ratio aluvionado/levaduras fluctúa entre 0,6 y 0,8 Kg/Kg.

Un aumento del ratio de sólidos (aumento de kg de aluvionado respecto a los kg de levadura) provoca una parada en el aumento de diferencia de presión respecto a los hectolitros filtrados.

Los kilos totales de aluvionado utilizados en este caso son 80. Si se hubiese operado en condiciones normales se hubiesen utilizado 100 kg. Este modo de operación permite ajustar la cantidad de aluvionado necesario para cada situación. Se ahorra cantidad de tierras cuando la cerveza tiene baja concentración en levaduras y se alarga el ciclo de filtración cuando la cerveza tiene mayor concentración de levaduras.

COMPOSICIÓN DE LA TORTA DE FILTRACIÓN

El porcentaje en volumen de tierras y de levaduras que se encuentran en el interior del filtro evoluciona como muestra la siguiente gráfica.



Gráfica 3-22. Optimización. Composición volumétrica de la torta de filtración.

La composición de la torta de filtración es homogénea a lo largo de todo el ciclo de filtración. Lo que permite tener un sistema más estable y controlado.

3.5.2 Conclusiones

La modificación de la cantidad de aluvionado en función de las características de la cerveza verde no es tarea fácil actualmente. La velocidad de actuación ante cambios en la concentración de levaduras de la cerveza es limitada, ya que saber la concentración de levaduras de la muestra lleva de 10 a 15 minutos como mínimo. El cálculo de los kilos de tierra y del volumen de agua desoxigenada necesarios para mantener el ratio de sólidos ha sido implementado con una hoja de cálculo Excel.

El control del ratio de sólidos permite mantener la permeabilidad de la torta de filtración prácticamente constante. Esto permite un funcionamiento más estable del filtro y la posibilidad de hacer más controlable la pendiente de filtración. Con pendiente de filtración me refiero a la velocidad de aumento de presión respecto a los hectolitros filtrados.

El control de la pendiente de filtración da lugar a la posibilidad de operar utilizando toda la capacidad del filtro con la cantidad mínima de ayuda filtrante para cada situación. El funcionamiento óptimo del filtro se obtiene cuando la presión máxima que es posible alcanzar en el filtro se da en el mismo momento en el que se ocupa todo el volumen libre destinado a la torta de filtración.

3.6 Celulosa como coadyuvante.

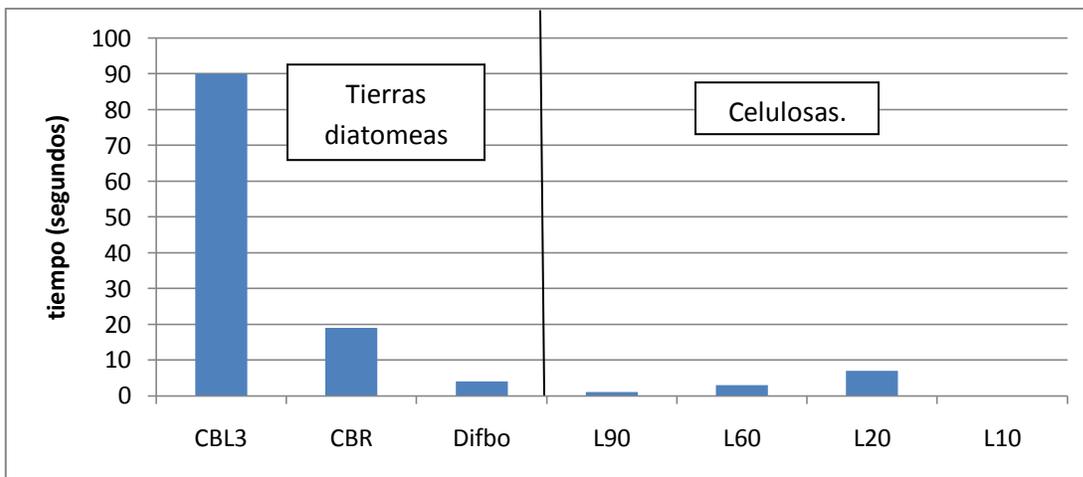
En este apartado se desea saber si es viable técnicamente la sustitución de tierras diatomeas por celulosas como aluvionado.

Existen varios tipos de celulosa que pueden ser utilizadas para filtración. En el *anexo IV* se adjuntan hojas de características técnicas de las celulosas con las que se ha trabajado. El proveedor de las celulosas es *JRS ibérica*.

3.6.1 Pre-estudio del comportamiento de las celulosas en el laboratorio

Se pretende utilizar un aluvionado con una permeabilidad similar a la actual con tierras diatomeas.

Las pruebas de permeabilidad consisten en formar una torta de filtración sobre una malla y forzar el paso un volumen determinado de agua destilada por esa torta. Se cronometra el tiempo que tarda en pasar ese volumen. Los resultados para materias puras es el siguiente:



3-23. Comparación de permeabilidades.

En el caso de L10 las partículas son tan pequeñas que pasan a través de la malla y es imposible formar una torta de filtración. Se espera que sea menos permeable que Vitacel® L20, aunque no se sabe en qué proporción. L10 son fibras de celulosas un poco más cortas y más densas que L20. Ver hojas de propiedades en los anexos.

Se observa que la permeabilidad de las tierras diatomeas es mucho menor que para las celulosas.

De este estudio se puede deducir que no es posible aluvionar celulosas con la misma permeabilidad que proporcionan las diatomeas. La permeabilidad que se obtendrá con celulosa será mayor.

Es de esperar que con mayores permeabilidades las pendientes de filtración que se obtengan sean menores. Es decir, la presión aumentará de manera más paulatina respecto a los hectolitros filtrados.

Las celulosas son fibras que se entrelazan entre sí. Si esta estructura es más permeable es debido a que el fluido atraviesa la torta más fácilmente. Esto puede ser debido a que la estructura es menos compacta; en ese caso existe la posibilidad de que sólidos que con las diatomeas se quedan retenidos, traspasen la torta de celulosas.

Por ello se decide comprobar, a nivel de laboratorio¹¹, si la celulosa permite el paso de levaduras u otras partículas sólidas en la filtración. Para ello se forma una precapa de tierras de diatomea (comparable con la utilizada actualmente, pero a nivel de laboratorio) y una precapa de celulosas, utilizando el mismo dispositivo que en el caso anterior. Los resultados son los siguientes:

Torta filtrante de tierras diatomeas

La cerveza a filtrar es cerveza verde con una concentración de levaduras de 9,6 millones/ml. Después de filtrar **no se observaron levaduras** y la turbidez fue **H90=65,92 °EBC**.

Torta filtrante de celulosas

La cerveza a filtrar es cerveza verde con una concentración de levaduras de 9,2 millones/ml. Después de filtrar **no se observaron levaduras** y la turbidez fue de **H90=0,42 °EBC**.

En ambos casos las levaduras quedan totalmente retenidas en la torta de filtración. Además, la turbidez en la muestra de cerveza filtrada con celulosas es mucho menor que la muestra de cerveza filtrada con tierras de diatomeas. Esto puede ser debido a que la celulosa atrae electrostáticamente a partículas pequeñas, haciendo que éstas se queden retenidas en el filtro.

Los resultados obtenidos en capacidad de retención de partículas con celulosas son muy favorables. Además de retener levaduras, la turbidez de la cerveza de salida es muy baja en comparación con la muestra utilizando diatomeas. La mayor limitación de estas pruebas es que se realizan con una bomba de vacío. La diferencia de presión máxima entre los dos extremos de la torta es 1bar. Por el contrario, en el sistema de filtración real, la torta deberá permanecer estable con diferencias de presión de hasta 4 bares.

¹¹En el Anexo VII se encuentran detallados los estudios de permeabilidad y filtrabilidad.

3.6.2 Prueba industrial con celulosas.

Las pruebas que se realizan en el filtro de candelas se harán analizando muestras de cerveza verde a la entrada del filtro. Regularmente se toman muestras de cerveza filtrada para obtener los valores de turbidez a la salida.

En primer lugar se realizan pruebas para comparar al comportamiento del filtro aluvionando Vitacel® L10 y aluvionando Vitacel® L60. La diferencia más notable entre L10 y L60 es que L10 se trata de fibras prácticamente cuadradas, mientras que L60 son más alargadas. La diferencia de densidades entre una y otra es de 0,06 g/cm³.

En segundo lugar, se hace un estudio más detallado del coadyuvante que mejor se ha comportado, Vitacel® L60.

3.6.2.1 Comparativa entre L10 y L60.

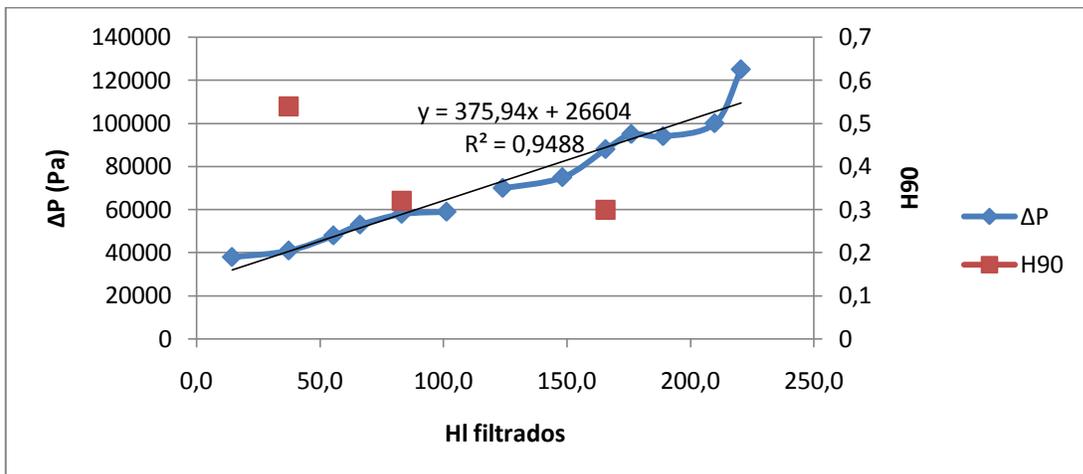
Las pruebas que se pueden hacer en el filtro de candelas son limitadas. No hay que olvidar que trabajamos en una industria que debe cumplir unas necesidades de producción. Si la cerveza que se filtra en estas pruebas no cumple las especificaciones de calidad requeridas no podrá salir a la venta.

Se desea determinar qué aluvionado funciona mejor en el filtro industrial. Vitacel® L10 o Vitacel® L60.

VITACEL L10

Se filtra cerveza tipo "A" con una concentración de levaduras de 7 millones/ml. El caudal de filtración es de 180HI/h. Se mantiene un ratio de sólidos de 0,6 Kgaluvionado/Kg levadura.

Los resultados obtenidos se muestran en la siguiente gráfica.



Gráfica 3-24. Vitacel L10. ΔP y H90 vs. HI filtrados.

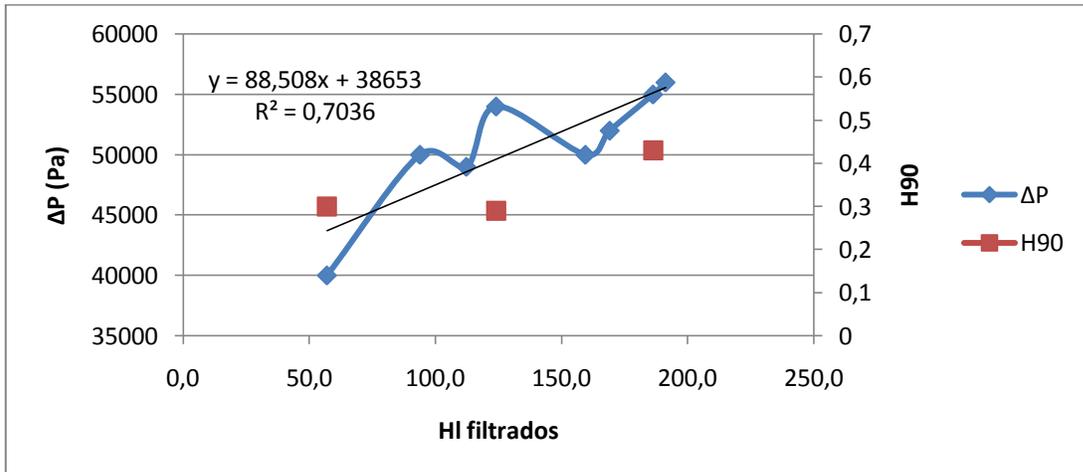
Se observa que la turbidez, inicialmente un poco alta, se mantiene dentro de los valores adecuados en todo momento.

La pendiente de filtración es 376 Pa/Hl. La pendiente de filtración esperada con tierras diatomeas para una muestra de cerveza con 7 millones de levaduras por mililitro va de 160 a 350 Pa/Hl. Es decir, la pendiente de filtración obtenida con celulosas es más alta que la que se obtiene con diatomeas, lo que provocará una saturación del filtro más temprana.

VITACEL L60

Se filtra cerveza verde tipo "A" con una concentración de levaduras de 5 millones/ml (exceptuando un primer golpe de levaduras de 17 millones/ml). El caudal de filtración es 180 Hl/h. El ratio de sólidos se mantiene en torno a 0,70 Kgaluvionado/Kglevadura.

El resultado obtenido en esta filtración se muestra en la siguiente gráfica.



Gráfica 3-25. Vitacel L60. ΔP y H90 vs. Hl filtrados.

Se observa que la turbidez se mantiene bastante por debajo de los valores límite. Los resultados son mejores que los obtenidos para L10, ya que en ningún momento se obtienen valores de 0,6°EBC.

La pendiente de filtración es mucho menor de lo esperado. Aluvionando con Vitacel® L60, obtenemos un valor de 89 Pa/Hl. Con tierras diatomeas, las pendientes de filtración que se han obtenido para muestras con una concentración de levaduras de 5 millones aproximadamente, van desde 160 hasta 260 Pa/Hl. Es decir, a priori se puede decir que utilizando este tipo de celulosas como aluvionado, se alargará el ciclo de filtración.

La torta de filtración ha soportado muy bien un golpe de levaduras inicial. La pendiente de filtración se ha mantenido baja y los valores de turbidez no han superado los límites permitidos.

Como punto negativo se observa que la evolución de la diferencia de presión respecto a los hectolitros filtrados no es tan lineal como sucede con tierras diatomeas.

A continuación se encuentra una tabla resumen de los resultados obtenidos.

Tabla 3-7. Comparación L10 y L60.

	Mill lev/ml	Kgaluv/Kglev	Pendiente (ΔP)vs.Vfilt	Pendiente con tierras	Turbidez <0,7EBC
Vitacel L10	7	0,61	376	160-350	SI
Vitacel L60	5	0,70	89	160-260	SI

En las posteriores pruebas que se realicen se utilizará Vitacel® L60 como aluvionado, ya que presenta unas mejores características de filtrabilidad (turbidez menor a la salida), y se pueden conseguir ciclos de filtración más largos debido a su baja pendiente de filtración.

3.6.2.2 Vitacel L60® como aluvionado.

Se realiza un estudio del ciclo de filtración aluvionando L60. Se pretende trabajar en el ratio óptimo de filtración para tierras diatomeas.

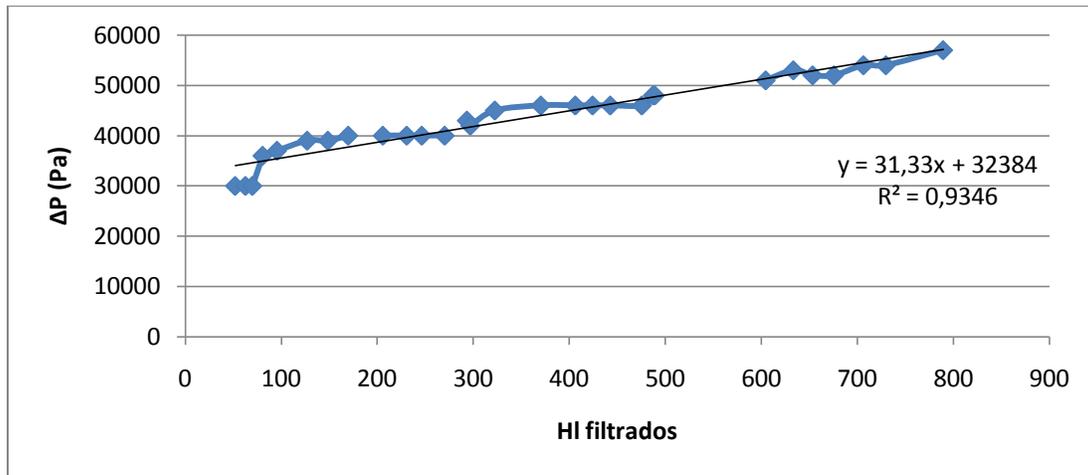
En el caso a estudiar se filtra cerveza tipo "A". Se alimenta cerveza verde proveniente de los tanques de maduración I y 2C.

El cambio de tanque de maduración durante el ciclo de filtración provocó un golpe de levaduras. Inicialmente (los primeros 270 hectolitros filtrados) la cerveza contiene 3 millones de levaduras por mililitro. En el golpe de levadura se ha medido una concentración de hasta 7 millones/ml¹². Para el resto del ciclo de filtración se alimenta cerveza con una concentración de levaduras de 3 millones/ml.

VARIACIÓN DE LA PRESIÓN EN FUNCIÓN DEL VOLUMEN FILTRADO.

La evolución de la diferencia de presión entre la entrada y la salida conforme avanza el ciclo de filtración se muestra a continuación.

¹² Los golpes de levadura no son homogéneos; el valor de la concentración de levaduras depende mucho del momento en el que se coja la muestra.



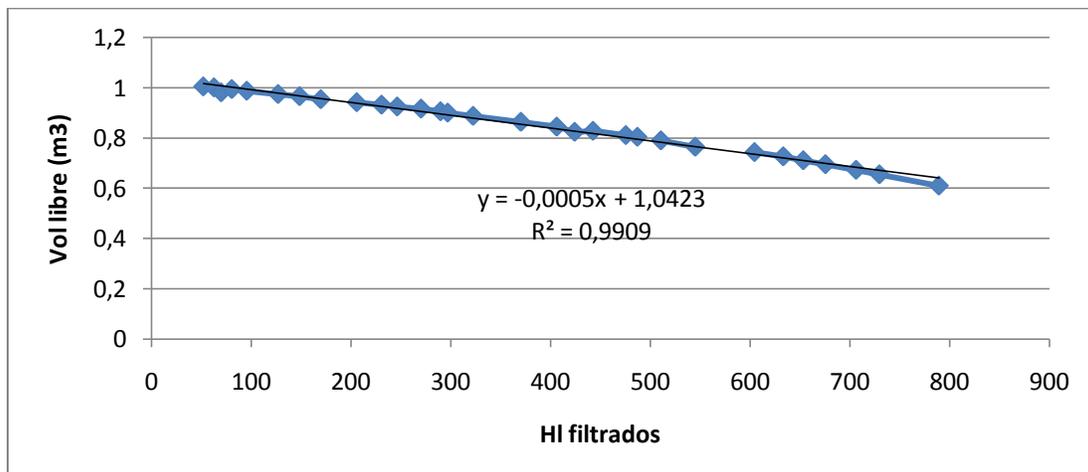
Gráfica 3-26. L60. Evolución de la presión respecto a los HI filtrados.

En comparación con los datos de tierras diatomeas, la pendiente obtenida es muy baja. Si se siguiese filtrando hasta que se alcanzasen 4 bares y no se tuviese límite de espacio se podrían filtrar 10900 hectolitros más.

La linealidad de la pendiente obtenida es mejor de lo esperado. Se obtiene una regresión de 0,9346.

EVOLUCIÓN DEL VOLUMEN OCUPADO DENTRO DEL FILTRO

El volumen libre disminuye conforme avanza el ciclo de filtración de la siguiente manera:

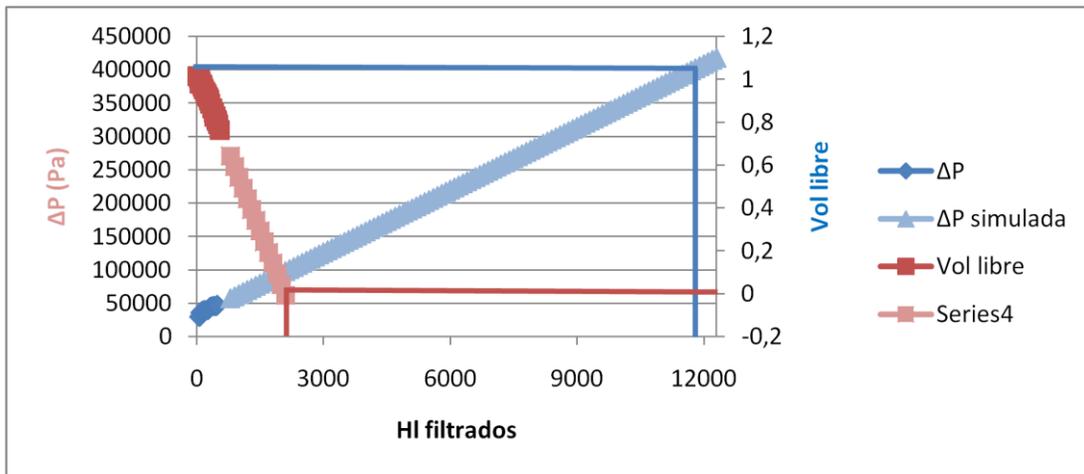


Gráfica 3-27. L60. Evolución del volumen libre dentro del filtro respecto a los hectolitros filtrados.

La evolución del volumen libre dentro del filtro sigue la misma tendencia para tierras diatomeas que para celulosas. Sin embargo el volumen libre disminuye más rápidamente para las celulosas porque son menos densas. Ocupa más volumen por gramo.

Si las condiciones permaneciesen constantes es de esperar que la disminución del volumen libre siga la misma tendencia. En ese caso se podrían filtrar en total 2100 HI.

Representando de manera conjunta la evolución que seguiría tanto la presión como el volumen libre se obtiene:



Gráfica 3-28. Celulosas. Saturación del filtro.

El ciclo de filtración se agotaría debido a que el espacio reservado a filtrar, estaría lleno de sólidos.

En el 100% de las filtraciones estudiadas en La Zaragozana utilizando como ayuda filtrante tierras de diatomeas el ciclo de filtración se agota debido a la permeabilidad. En el caso de utilizar celulosa como aluvionado se observa que el factor limitante es el espacio dentro del filtro. La pendiente de filtración es muy baja.

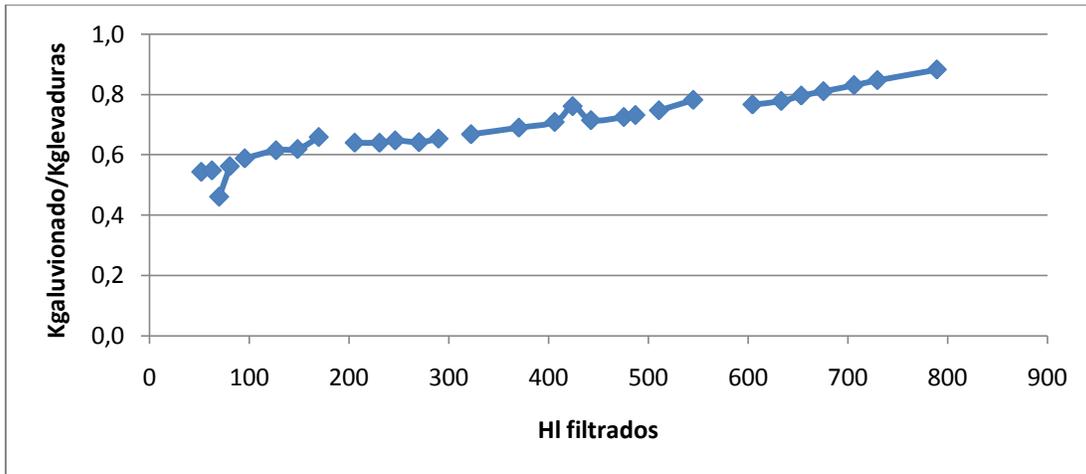
CERVEZA FILTRADA

La cerveza filtrada cumple con las especificaciones requeridas para superar los parámetros de calidad.

La turbidez de la cerveza filtrada medida a la salida del filtro se mantiene en todo momento por debajo de 0,7 °EBC. Los resultados de los análisis de calidad de cerveza filtrada y embotellada y los análisis de estabilidad coloidal dan resultados que entran dentro de los valores esperados.

RATIO DE SÓLIDOS

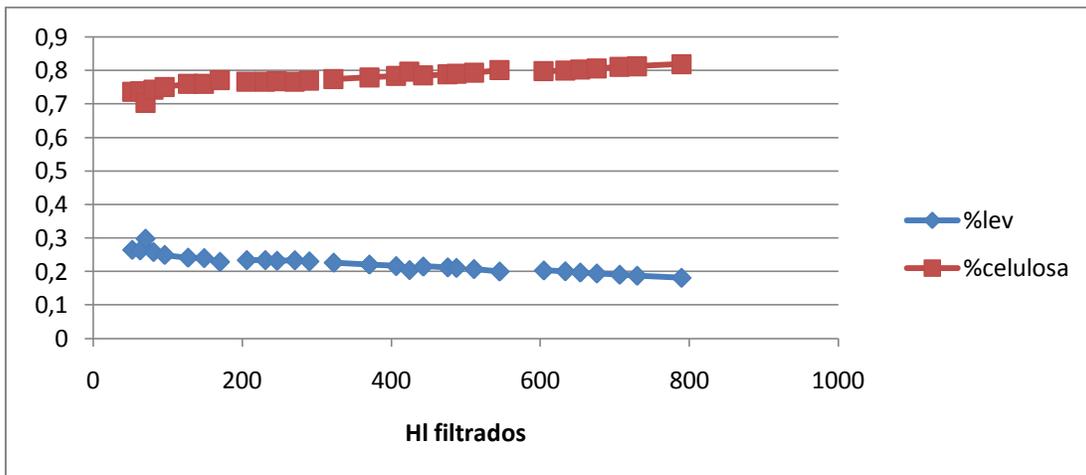
El ratio de sólidos se pretende mantener constante. Experimentalmente se obtiene que el ratio celulosa/levaduras aumenta ligeramente con los hectolitros filtrados.



Gráfica 3-29. Ratio de sólidos vs. HI filtrados

Los valores del ratio de sólidos oscilan entre 0,5 y 0,9 Kg aluvionado/Kg levadura.

La evolución volumétrica de la torta de filtración se muestra a continuación.



Gráfica 3-30. Composición de la torta de filtración.

La composición de la torta de filtración es bastante homogénea. Esta composición permite obtener pendientes de filtración muy bajas.

La composición volumétrica de celulosa en la torta está en torno al 79-80%. Este porcentaje es mayor que para las tierras diatomeas (60%) con un ratio de sólidos similar. Esta mayor proporción

en volumen, debida a su menor densidad, hace que la permeabilidad sea alta y se obtengan pendientes de filtración menores.

CONCLUSIONES DE OPERAR CON CELULOSA COMO ALUVIONADO.

Se puede afirmar que la celulosa se puede utilizar como ayuda filtrante; permite cumplir las especificaciones de calidad.

De los resultados obtenidos se deduce que utilizando celulosa como aluvionado se obtendrán pendientes de filtración bajas. El filtro se saturará por falta de espacio, no por falta de permeabilidad.

4 Comparativa teórica de costes de filtración.

En este apartado se compran los costes por hectolitro de cerveza filtrada trabajando con diatomeas y con celulosas como aluvionado.

En los apartados anteriores se ha comprobado que la celulosa es una opción tecnológicamente viable: La cerveza filtrada cumple los parámetros de calidad que permiten su venta.

Sin embargo, el coste por kilo de la celulosa es de 2,3 €, mientras que el coste por kilo de las diatomeas es de 0,60 €.

4.1 Comparabilidad entre diatomeas y celulosas.

Las diatomeas y las celulosas presentan un comportamiento muy distinto en cuanto a permeabilidad y volumen ocupado. Se determina que una situación comparable es aquella en la que la composición volumétrica de la torta sea similar. Es decir, se comparan situaciones en las que el porcentaje volumétrico de la torta (aluvionado y levadura) sea el mismo. Las fórmulas que relacionan el ratio de sólidos y el porcentaje volumétrico en la torta de filtración son las siguientes.

$$\%aluvionado_{torta} = \frac{\frac{kg_{aluvionado} * 1000}{kg_{levadura} * \rho_{aluvionado} \left[\frac{g}{cm^3}\right]}}{\frac{kg_{aluvionado} * 1000}{kg_{levadura} * \rho_{aluvionado} \left[\frac{g}{cm^3}\right]} + 1}$$

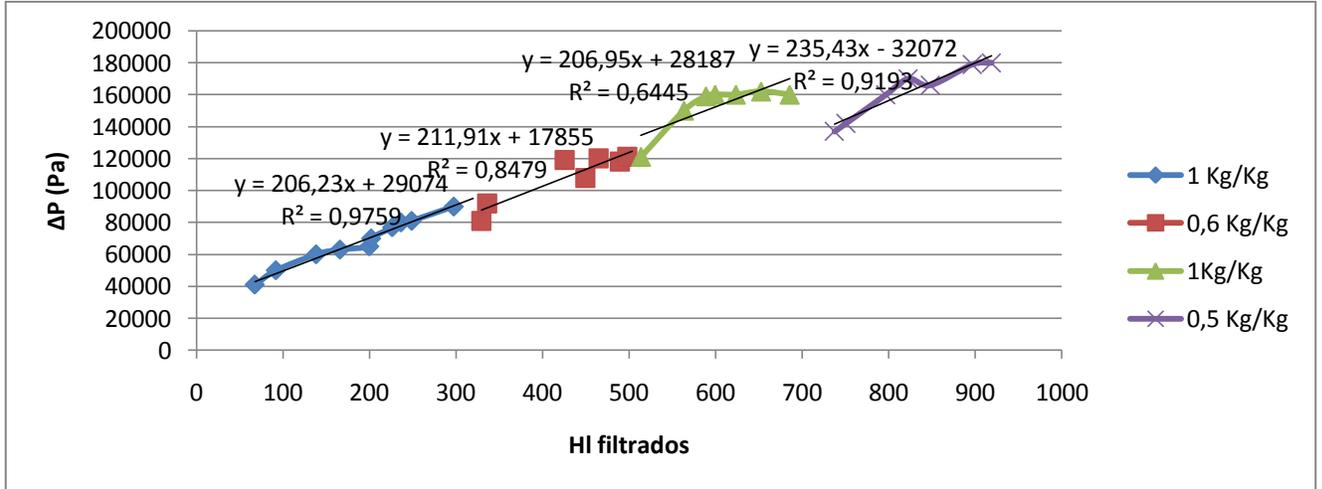
$$\%levadura_{torta} = 100 - \%aluvionado_{torta}$$

El volumen del aluvionado en el caso de las celulosas es mucho mayor que en el caso de las diatomeas. Se ha encontrado una filtración de diatomeas en la que el ratio de sólidos es 1 kg/kg, lo que proporciona un porcentaje de aluvionado en la torta de 70%.

4.1.1 Diatomeas

Nos encontramos ante un ciclo de filtración en el que se filtró cerveza tipo "A" y tipo "C". La concentración de levaduras es prácticamente constante en todo el ciclo de filtración, oscila de 3 a 4 millones/ml.

La pendiente de filtración evoluciona como muestra la siguiente gráfica.



Gráfica 4-1. Diatomeas. Presión vs. HI filtrados

El primer tramo se considera de estabilización.

Se observa que en el resto de tramos que un aumento del ratio de sólidos genera una disminución de la pendiente de filtración y viceversa.

La siguiente tabla resume los datos relacionados de ratio de sólidos, pendiente de filtración y composición volumétrica de la torta de filtración.

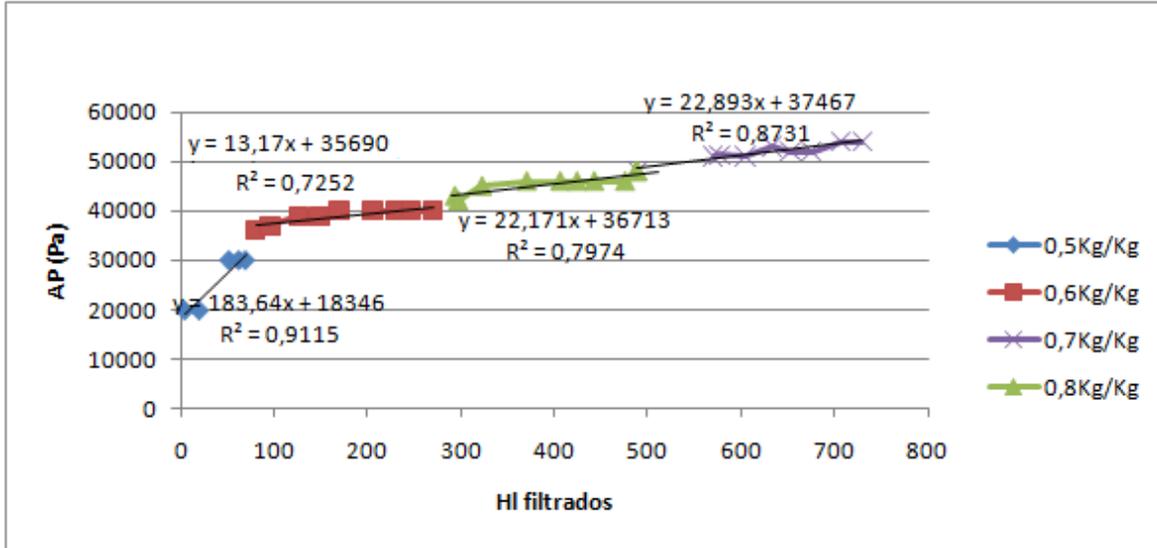
Tabla 4-1. Diatomeas. Ratio sólidos, pendiente filtración y composición de la torta.

Kg/Kg	pendiente	%aluv	%lev
1	206,23	No estable	
0,6	211,91	58%	42%
1	206,95	70%	30%
0,5	235,43	53%	47%

Para una composición de la torta de 70% de aluvionado y 30% de levaduras se necesita un ratio de 1 kg/kg y se trabaja con una pendiente de 207 Pa/Hl.

4.1.2 Celulosas

Se filtra cerveza verde tipo "A" con una concentración de levaduras de 5 millones/ml. Representando la evolución de la diferencia de presión respecto a los hectolitros filtrados se halla la siguiente gráfica:



Gráfica 4-2. Celulosa. Presión vs. HI filtrados.

Se observa que la pendiente de filtración entre tramo y tramo (exceptuando el periodo de estabilización) es muy similar.

Cada tramo tiene una pendiente de filtración que corresponde a un ratio de sólidos determinado. A continuación se puede encontrar una tabla resumen, donde también se especifica el porcentaje volumétrico de la torta de filtración con ese ratio de sólidos.

Tabla 4-2. Celulosas. Ratio de sólidos, pendiente de filtración y composición de la torta.

Tramo	Kg/Kg	pendiente	%celulosa	%lev
1	0,6	183,64	No estable	
2	0,5	13,170	72%	28%
3	0,7	22,171	78%	22%
4	0,8	22,893	80%	20%

El primer tramo se considera de estabilización y no se tendrá en cuenta como valor representativo.

Al contrario que para la mayoría de filtraciones con tierras, al aumentar el ratio de sólidos (Kgaluvionado/Kglevadura) aumenta la pendiente de filtración.

Un ratio de 0,5 Kg/kg genera una torta de 72 % celulosas y 28 % levaduras. La pendiente que se obtiene es de 13,17 Pa/HI.

4.2 Costes generados en cada ciclo de filtración.

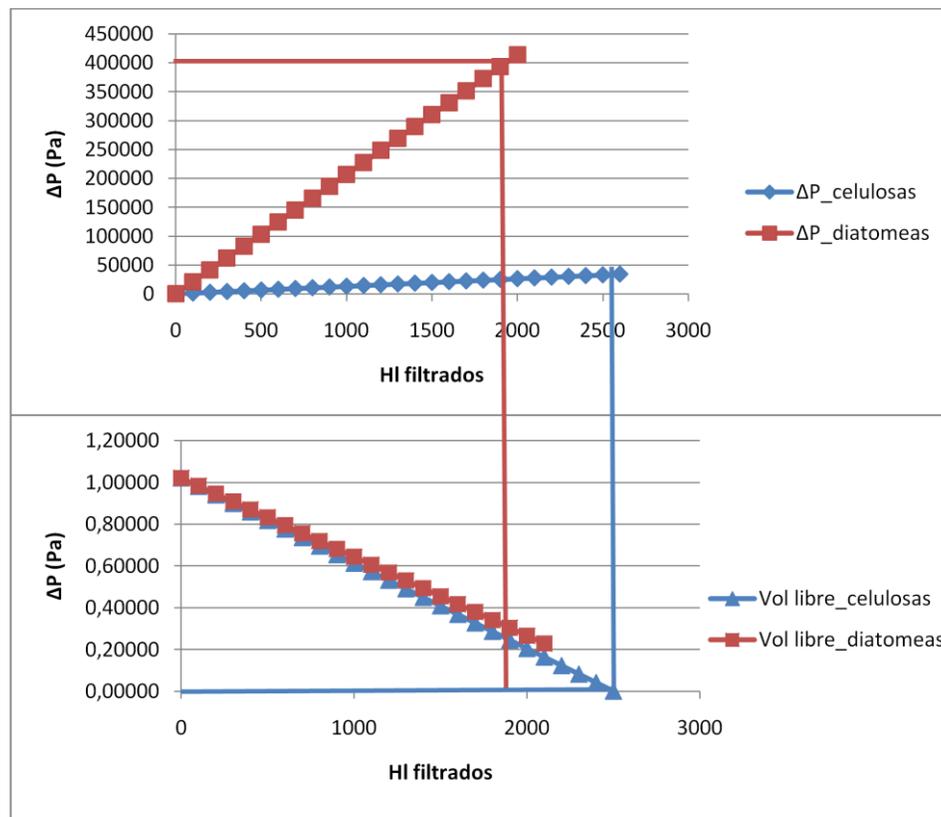
Se simula una situación ideal, en la que no existe periodo de estabilización del filtro y la pendiente de filtración se mantiene en todo momento constante. La concentración de levaduras es igual a 3 millones/ml y el ratio de sólidos permanece constante.

Se comparan las dos ambientes que se resumen en la siguiente tabla.

Tabla 4-3. Situaciones a estudiar.

Aluvionado	Kg/Kg	Pendiente(Pa/HI)
Celulosa	0,5	13,17
Diatomeas	1	207

El filtro se satura por razones distintas en el caso de las celulosas y las diatomeas. Esto se puede observar en la siguiente gráfica.



Gráfica 4-3. Saturación del filtro.

Se observa que la saturación del filtro en el caso de las diatomeas se da debido a que se alcanza la presión máxima a los 2000 HI filtrados. En el caso de las celulosas el ciclo de filtración se termina debido a que se ha ocupado todo el volumen disponible a los 2600 HI.

Se desea saber el coste total por hectolitro de cerveza filtrada. (€tot/HI)

$$\begin{aligned} \frac{\text{Coste total}}{HI} &= \frac{\text{coste precapa}}{HI} + \frac{\text{coste aluvionado}}{HI} \\ &= \frac{\text{€/Kg}_{\text{diatomeas}} * \text{Kg}_{\text{precapa}}}{HI_{\text{ciclofiltración}}} + \frac{\text{€/Kg}_{\text{aluvionado}} * \text{Kg}_{\text{aluvionado}}}{HI_{\text{ciclofiltración}}} \end{aligned}$$

El coste de la celulosa es 2,3€ por kilo y el de las tierras diatomeas es de 0,6 €/kg.

La precapa está formada por 75 Kg de tierras diatomeas en todos los casos. Se hace una precapa al comienzo de cada ciclo de filtración. Cuantos más hectolitros se filtren en un ciclo de filtración, menor será el coste de la precapa por hectolitro (€prec/HI).

El coste de aluvionado por hectolitro filtrado (€aluv/HI) depende de la cantidad de tierras necesarias para mantener la composición volumétrica de la torta de filtración. Los kilos de aluvionado por hectolitro en los casos óptimos a estudiar son: 0,057 Kg/HI para las celulosas y 0,115 Kg/HI para las diatomeas.

$$\begin{aligned} \frac{\text{Kg}_{\text{aluvionado}}}{HI} &= \text{Conc}_{\text{lev}} * \text{Vol}_{\text{lev}} * \rho_{\text{lev}} * \frac{\text{Kg}_{\text{aluvionado}}}{\text{Kg}_{\text{levadura}}} \\ &= 3 * 10^{11} \frac{\text{lev}}{HI} * 2,68 * 10^{-16} \frac{\text{m}^3}{\text{lev}} * 1000 \frac{\text{Kg}_{\text{lev}}}{\text{m}^3} * \frac{\text{Kg}_{\text{aluv}}}{\text{Kg}_{\text{lev}}} \end{aligned}$$

La cantidad de aluvionado utilizado para el caso de las celulosas es 149kg y para el caso de las diatomeas es 229 kg.

A continuación se muestra una tabla resumen con los datos obtenidos:

Tabla 4-4. Coste por hectolitro filtrado.

Ayuda filtrante	Pa/HI	Kg/Kg	HI hasta sat.	Kg/HI	Kg aluvionado	€aluv/Kg	€aluv/HI	€prec/HI	€tot/HI
Celulosas	13,17	0,5	2600	0,06	148,86	2,30	0,13	0,02	0,15
Diatomeas	207	1	2000	0,11	229,02	0,70	0,08	0,03	0,11

Se observa que el coste total de celulosa por hectolitro filtrado es 4 céntimos más que para diatomeas.

4.3 Costes anuales de filtración.

Otro factor importante a tener en cuenta es el tiempo de limpieza entre los ciclos de filtración. En este estudio se considera el tiempo de limpieza como un coste adicional, ya que el filtrador deja de hacer otras tareas para ocuparse de limpiar el filtro. El tiempo de limpieza es aproximadamente 30 minutos.

La producción anual de La Zaragozana es aproximadamente 600000 HI/año. Se estima que un filtrador recibe 15 euros por hora. Suponiendo que filtremos a una velocidad constante de 180 HI/h una cerveza verde con una concentración constante de levaduras de 3 millones/ml en condiciones óptimas obtenemos los datos resumidos en la siguiente tabla:

Tabla 4-5. Coste anual de filtración.

HI/año	HI/h	euros/hora
600000	180	15

	Celulosa	Diatomeas
nºciclos filtración	231	300
horas/ciclo	14	11
horas limpieza	115	150
euros en limpieza	1731	2250
euros en filtración	91128	63845
Coste anual (euros)	92859	66095

Coste/HI	0,155	0,110
----------	-------	-------

El coste por hectolitro de cerveza verde considerando como coste extra los tiempos de limpieza son: 0,155 €/HI para celulosas, 0,110 €/HI para diatomeas.

4.4 Conclusiones del estudio económico.

La diferencia de precio total entre el uso de las celulosas y las diatomeas como aluvionado es de 0,045 €/Hl.

Este estudio económico tiene sus limitaciones, ya que está basado en un comportamiento ideal imposible de conseguir en el sistema de filtración que se tiene. Sin embargo da una idea de que si se consigue trabajar de forma óptima, aunque el precio por kilo de las celulosas sea mayor, el coste por hectolitro de cerveza filtrada no variará demasiado.

Se recomienda realizar más pruebas utilizando celulosa como aluvionado para hallar el óptimo de trabajo.

Se comprueba la viabilidad técnica y económica del uso de celulosas como coadyuvantes de filtración.

5 Conclusiones

En este proyecto se ha realizado un estudio del sistema de filtración de cerveza verde existente en "La Zaragozana S.A".

Las conclusiones principales de este proyecto son las siguientes:

- Es posible optimizar el sistema de filtración modificando la cantidad de aluvionado en función de las características de la cerveza verde. El ratio óptimo está en torno a 0,8 Kg aluvionado/Kg levadura.
- Técnicamente es viable la utilización de celulosas como coadyuvantes de filtración. La celulosa Vitacel[®] L60 como aluvionado permite un aumento más paulatino de la presión de entrada al filtro. Las características de la cerveza filtrada a la salida cumplen los parámetros de calidad requeridos para su venta. El ciclo de filtración se agota debido a falta de espacio en el filtro.
- Se han validado teorías existentes y cuantificado o modelizado las situaciones para el caso particular de "La Zaragozana. S.A":
 - La saturación del filtro, con el modo de operación actual, finaliza siempre debido a la disminución de permeabilidad.
 - La relación existente entre levaduras y turbidez es lineal. El factor de relación para el caso particular de La Zaragozana va de 11 a 12 turbidez/concentración_{lev}. Esta relación se cumple para un rango de valores que va de 2 a 23 millones de levadura por mililitro. Esta validación permite hallar la concentración de levaduras a la entrada del filtro mediante una medida indirecta y rápida de turbidez.
 - El tamaño de las levaduras disminuye al aumentar la generación.
 - La viscosidad de la cerveza verde se ve afectada, de forma moderada, por la concentración de levaduras, el extracto real, el porcentaje de alcohol y la temperatura de operación.
 - La celulosa presenta mucha mayor permeabilidad que las tierras diatomeas. En el sistema real esto implica un menor aumento de la presión por hectolitro filtrado.
 - El factor limitante en los ciclos de filtración con celulosa, es el espacio en el filtro.
- Económicamente es más rentable el uso de tierras diatomeas que de celulosas como coadyuvante de filtración.
- La sustitución de la precapa actual por una precapa formada únicamente por celulosas es viable técnicamente, siempre y cuando se utilice celulosa microcristalina. Una precapa formada por celulosas sin celulosa microcristalina tiene problemas de rigidez, lo que hace que la torta se rompa si la presión de entrada supera los 2 bares.
- La optimización del filtro de manera real se puede llevar a cabo instalando un nefelómetro a la entrada del filtro. Así se podrá saber instantáneamente la concentración de levaduras y se podrá actuar sobre la cantidad de coadyuvante necesario en la filtración.

IDEAS NACIDAS DE ESTE PROYECTO:

- Proyectos que actúan sobre la línea de producción del sistema de filtración
 - Instalación de un nefelómetro a la entrada del filtro.
 - Instalación de un sistema mecánico de adición de coadyuvantes de filtración al tanque de aluvionado.
 - Tras estos estudios se podría empezar a pensar en:
 - Conexión del nefelómetro con el sistema para hacer que el éste opere de forma automática. Esto conlleva: conexión del nefelómetro con el sistema mecánico de adición de coadyuvantes de filtración y conexión del nefelómetro con una válvula que permita desviar la cerveza y que ésta no entre al filtro. Ante golpes de levadura el nefelómetro no conducirá la cerveza al interior del filtro. Las purgas previas a la filtración se realizarían automáticamente.
 - Viabilidad de la instalación de un tanque de aluvionado paralelo que ayude a solventar los problemas puntuales de los golpes de levadura. Consistiría en un tanque de aluvionado que contenga una concentración mucho mayor de la suspensión de coadyuvantes que el tanque usado actualmente. Se conectaría a la entrada de cerveza verde al filtro. El nefelómetro ante un aumento en la concentración de levaduras le enviará una señal a este tanque de aluvionado para que abra una válvula en la proporción necesaria para que el golpe de levaduras no provoque pérdida de permeabilidad. Si la concentración de levaduras persiste el tanque de aluvionado principal modificará la concentración de la suspensión, en caso contrario la válvula que conecta el tanque de aluvionado 2 con la tubería de entrada al filtro se cerrará.
- Proyectos que actúan sobre los coadyuvantes de filtración:
 - Optimización de la cantidad de celulosas requerida en función de las características de la cerveza verde. Esto consistirá en:
 - Estudio de mercado. Se intentará conseguir una celulosa con características físicas similares a Vitacel[®] L60, pero con mayor densidad.
 - Experimentación disminuyendo el ratio de sólidos lo máximo posible, sin comprometer las características de la cerveza filtrada. La disminución del ratio de sólidos permitirá ciclos de filtración más largos. Los ciclos de filtración operando con celulosa finalizan debido a la falta de espacio libre en el filtro, disminuyendo el ratio de sólidos se disminuye la cantidad de aluvionado

introducida y la saturación del filtro debido a la ocupación de todo el volumen libre se dará más tarde.

- Es posible que con esta optimización el precio de las celulosas por hectolitro filtrado sea equiparable al de las diatomeas.

- Viabilidad de la sustitución de la precapa actual por una precapa formada íntegramente por celulosas.

- Viabilidad del uso del residuo obtenido tras la filtración con celulosas como alimentación de una planta potabilizadora de agua.

6 Bibliografía

Brewing Science. Volúmenes 1, 2 y 3.

Pollok.

1981.

Elaboración de la cerveza.

Ian S. Hornsey.

1999.

Beer Filtration, Sterilization and sterilisation.

European Brewery Convention.

1999.

El cervecero en la práctica.

Master Brewers Association of the Americas.

2002.

An Analysis of Brewing Techniques.

George J Fix. Lavie A Fix.

1999.

An overview of beer filtration using cellulose fibers.

Frank Braun, Aktienbrauerei Kaufbeuren AG, Kaufbeuren; Prof. Dr. –Ing. Thomas Becker, Prof. Dr.-Ing. Werner Back and PD, Dr.-Ing. Martin Krottenthaler, Technische Universität München, Institute of Brewing and Beverage Technology, Brauwelt International 2011/III.

Filtración cuidadosa del vino, aplicación de celulosa.

Thomas Jung. Erbslöh Geisenhem.

Octubre 2007.

Trials with an alternative filter aid based on cellulose fibre.

G. Blümelhuber, B. Bleier, and R. Meyer-Pittroff, Freising-Weihenstephan.

Brauwelt International 2003/VI.

Advances in filter aid and precoat filtration technology.

Thomas E. Sulpizio.

Presentation at the American Filtration and Separations Society.

Abril 1999.

Particle Removal by Powder Filters.

J. G. Freeman.

Journal of the institute of Brewing and Distilling.

Noviembre-Diciembre 1995. Vol 101.

The influence of particle properties on filtration.

Richard Wakeman.

Science Direct

2007.

Determinación de la energía de activación de flujo en ligantes asfálticos.

Delmar Salomón Coe, Huachun Zhai Cui.

Idaho Asphalt Supply (IAS).

2003.

Curso de Reología Aplicada.

Dr. Javier Blasco Alberto.

Área Mecánica de Fluidos. Centro Politécnico Superior. Universidad de Zaragoza.

2006.

Cost-efficient and future-compatible. Independent precoat filtration.

Markus Lübbe and Peter Gattermeyer.

Brauwelt International. 2010/VI.

Malting and Brewing Science. Vol2.

J.S.Hough, D. E. Briggs, R. Stevens, T.W. Young.

1999

Principios of Brewing Science

George fix

1999

Análisis Químico Cuantitativo

Daniel C. Harris.

Ed Reverté. 2003.