UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA Y AMBIENTAL

VALPARAÍSO – CHILE

"FACTIBILIDAD TÉCNICA-ECONÓMICA PARA EVALUAR LA IMPLEMENTACIÓN DE UN SEPARADOR CENTRÍFUGO EN EL AREA DE FILTRACIÓN DE PLANTA CERVECERA CCU TEMUCO"

NICOLÁS IGNACIO VALDÉS LÓPEZ

Memoria de Titulación para Optar al Título de Ingeniero Civil Químico

Profesor Guía

Dr. SERGIO ALMONACID MERINO

Profesor Co – referente

Dr. RICARDO SIMPSON RIVERA

Valparaíso, 2019

Resumen

Debido a la competitividad y las exigencias que presenta el mundo empresarial en la actualidad, las industrias se hallan en la búsqueda continua de herramientas, desarrollos y mejoras que permitan optimizar sus procesos productivos; es decir, que conlleven a generar una mayor cantidad de producto de interés con respecto a las materias primas y los recursos que se utilizaron para la realización de los mismos.

En el proceso de elaboración de cerveza, posterior a la operación de fermentación, la cerveza debe ser clarificada, lo que implica la separación de la fase sólida o levaduras de la fase líquida. Para esto la cerveza pasa a través de filtros de tierras diatomeas a fin de alcanzar los estándares necesarios de claridad y brillo. Sin embargo, esta clarificación es un proceso extremadamente lento y no satisface las necesidades de la industria de obtener resultados más rápidos y controlables.

Los separadores centrífugos permiten reducir considerablemente la cantidad de diatomeas utilizadas en el área de filtración de cervezas, explotando al máximo la capacidad de los filtros, ahorrando tiempo y dinero. Se propone disminuir los tiempos de ciclos de filtración del proceso CCU en el Filtro de tierras Kieselguhr, implementando un separador centrifugo en el proceso, sin que la calidad de la cerveza se vea afectada, disminuyendo los costos de producción del producto final y de paso brindar una ayuda al medio ambiente.

El proceso de separar sustancias de diferente densidad mediante movimiento giratorio a alta velocidad se conoce como centrifugación. Esta separación está basada en la teoría de la sedimentación (Ley de Stokes), en la cual se establecen los aspectos del movimiento de un sólido en un líquido cuando existe un gradiente de densidad, movimiento que puede ser causado por la fuerza gravitacional o por una fuerza centrífuga.

Para poder llevar a cabo todas estas mejoras, se realizaron en primera instancia caracterizaciones físico química de las cervezas CCU para obtener así parámetros como densidad y viscosidad de los caldos madres, tamaño de partícula, entre otras variables; esto combinado con la teoría de centrifugación se pueden obtener los parámetros Sigmas característicos de la cerveza CCU y para cada caldo madre, de esta forma se puede encontrar la centrifuga que se adecue al proceso en cuestión.

Del análisis económico desarrollado se obtuvieron los indicadores económicos del proyecto; donde para el caso base se proyecta un valor actual neto (VAN) de 8000 UF, tasa interna de retorno (TIR) de un 31%, Payback de 5 años y un ahorro de 750 horas de proceso al año, todo esto evaluado en un horizonte temporal de 10 años.

Abstract

Due to the competitiveness and the demands that the business world presents today, the industries are in the continuous search for tools, developments and improvements that allow optimizing their production processes; that is, that lead to generate a greater amount of product of interest with respect to raw materials and resources that were used for the realization of them.

The production of beer, like many productive processes, requires the efficient use of energy, inputs and process times; as in any industrial field, these variables are very relevant, the amount of fuel used, the electric power consumption, thermal energy consumption and the time of the process cycles have a negative impact on the cost of production and on the environment.

In the brewing process, after the fermentation operation, the beer must be clarified, which involves the separation of the solid phase or yeasts from the liquid phase. For this the beer passes through diatomaceous soil filters in order to reach the necessary standards of clarity and brightness. However, this clarification is an extremely slow process and does not meet the needs of the industry for faster and more controllable results.

The process of separating substances of different density by rotating movement at high speed is known as centrifugation. This separation is based on the theory of sedimentation (Stokes' Law), in which aspects of the movement of a solid in a liquid are established when there is a density gradient, movement that can be caused by gravitational force or by a centrifugal force.

The centrifugal separators allow to considerably reduce the amount of diatoms used in the filtration area of beers, exploiting the capacity of the filters to the maximum, saving time and money.

In order to carry out all these improvements, physic chemical characterizations of the CCU beers were carried out in the first instance to obtain parameters such as density of the mother liquors, viscosity of the mother liquors, particle size, among other variables; This combined with the centrifugation theory can obtain the Sigmas characteristics of the CCU beer and for each stock, in this way you can find the centrifuge that suits the process in question.

It is proposed to reduce the filtration cycle times of the process in the Kieselguhr soil filter, without affecting the quality of the beer, reducing the production costs of the final product and helping the environment.

From the economic analysis developed, the economic indicators of the project were obtained; net present value (NPV) of 8000 UF, internal rate of return (IRR) of 31% and a PAYBACK of 5 years, all evaluated within a time horizon of 10 years.

Índice General

Capítulo I: Introducción

1.1 Contexto: Elaboración de la cerveza.....12
1.2 Definición del problema y fundamentos de la Memoria.....13
1.3 Objetivos de la memoria.....14
1.3.1 Objetivo principal.....14
1.3.2 Objetivos específicos.....14

Capitulo II: Antecedentes

2.1 Materias primas fundamentales 16
2.2 Descripción general elaboración CCU.....21
2.2.1 Etapa de cocimiento.....21
2.2.2 Etapa de Fermentación.....24
2.2.3 Etapa de Filtración.....25
2.3 Proceso de filtración CCU.....27
2.4 Principales equipos usados en el área de filtración.....30
2.4.1 Tanque Buffer de alimentación de filtro.....30
2.4.2 Filtro de velas.....30
2.4.2.1 Operación de filtro Kieselguhr (KG).....33
2.4.3 Filtro de PVPP.....34
2.4.4 Post filtro (pulidor).....35
2.4.5 Tanque Buffer de filtrado.....36
2.4.6 Planta CIP.....37
2.4.7 Tanque cabeza y cola.....37
2.4.8 Estación de mezclas de tierra y preparación de aditivos.....38
2.4.9 Planta de carbonatación.....38
2.4.10 Planta dilución gruesa y fina.....39
2.4.11 Planta desaireación del agua y tanque de espera.....39

2.5 El proceso de centrifugación.....40
2.5.1 Fundamentos de la centrifugación.....40
2.5.1.1 Ley de Stokes.....41
2.5.1.2 Sedimentación por acción de la gravedad.....43
2.5.1.3 Sedimentación centrifuga.....43
2.5.1.4 Factor G.....45
2.5.2 Equipos de sedimentación centrifuga.....45
2.5.2.1 Centrifuga tubular.....46
2.5.2.2 Centrifuga de tazón solido.....47
2.5.2.3 Centrifugas de cámara múltiple.....48
2.5.2.4 Centrifugas decantadoras de tornillo.....49
2.5.2.5 Centrifuga de discos.....50
2.5.3 Diseño de equipos de centrifugación.....52
2.5.3.1 Tiempo de residencia en una centrifuga de discos.....53
2.5.3.2 Calculo del tiempo de sedimentación y el gasto volumétrico.....56
2.5.3.3 Factor Sigma.....59

Capitulo III: Materiales y Métodos

3.1 Estimación de factores Sigma del proceso.....61
3.1.1 Densidad del caldo madre (ρ_L).....62
3.1.2 Diámetro de partícula (d_p).....62
3.1.3 densidad del sedimento (ρ_S).....63
3.1.4 viscosidad del caldo madre (μ).....63
3.2 Variables de proceso: Turbidez ($\check{T}$), %peso de sedimentos ($\%P_{LEV}$), Concentración de levaduras (C_{LEV}), Volumen de cerveza filtrada ($V_{FILTRADO}$).....65

3.2.1 Curva Turbidez (Ť) vs %peso de sedimentos ($\%P_{LEV}$)……65

3.2.2 Curva Concentración de levaduras (C_{LEV}) vs Turbidez (Ť)……67

3.2.3 Curva Concentración de levaduras (C_{LEV}) vs %peso de sedimentos ($\%P_{LEV}$)……67

3.2.4 Curva Turbidez (Ť) vs Volumen de cerveza filtrada ($V_{FILTRADO}$)……68

3.3 Estimación de la concentración de células de levadura de diseño……68

3.4 Diseño de simulador de proceso de centrifugación……69

3.4.1 Centrifugación de células de levadura en la salida constante (tiempo variable) ……70

3.4.2 Centrifugación con tiempo de proceso constante (concentración de células de levadura variable) ……71

Capítulo IV: Resultados

4.1 Estimación de factores Sigma de proceso……73

4.1.1 Densidad de caldo madre (ρ_L)……73

4.1.2 Densidad del sedimento (ρ_S)……74

4.1.3 Viscosidad del caldo madre (μ)……74

4.2 Variables de proceso e intervalos de confianza……77

4.2.1 Curva Turbidez (Ť) vs recuento celular de levaduras (C_{LEV})……77

4.2.2 Curva Turbidez (Ť) vs Porcentaje peso de sedimentos ($\%P_{LEV}$)……78

4.2.3 Curva Turbidez (Ť) vs Volumen filtrado de cerveza ($V_{FILTRADO}$)……78

4.3 Estimación de la concentración de levaduras de diseño……79

4.4 Diseño del simulador de proceso de centrifugación……81

4.5 Calculo de horas de proceso……82

4.6 Evaluación económica……88

4.6.1 Criterios de evaluación económica del proyecto.....88
4.6.2 Selección de la tasa de descuento.....89
4.6.3 Estructura de costos e ingresos.....90
4.6.4 Análisis de sensibilidad.....94
4.6.4.1 Variación de la tasa de descuento.....95
4.6.4.2 Variación de la producción de cerveza.....95
4.6.4.3 Variación del porcentaje de utilización de la centrifuga.....96
4.6.4.4 Variación del precio de compra [UF/ton] de tierras Kieselguhr.....96

Conclusiones generales y recomendaciones.....97
Bibliografia.....98
Anexos.....99

Índice de Figuras

Figura 1. Productos CCU línea cervecería.....12
Figura 2. Plantaciones de cebada cervecera.....16
Figura 3. Grano de cebada en corte longitudinal.....17
Figura 4. Planta de lúpulo.....18
Figura 5. Estructura de una levadura.....19
Figura 6. Reproducción de una levadura.....20
Figura 7. Curva de maceración del arroz y malta 22
Figura 8. Diagrama de bloques del área de filtración.....28
Figura 9. Tanque Buffer de alimentación a filtro de tierras.....30
Figura 10. Filtro de tierras de diatomeas.....31
Figura 11. Flujo de cerveza en el filtro de diatomeas.....32
Figura 12. Flujo de cerveza en la vela.....32

Figura 13. Filtro de PVPP.....34

Figura 14. Filtro tamiz (filtro pulidor) 35

Figura 15. Flujo de cerveza en Filtro Pulidor.....36

Figura 16. Tanque Buffer de cerveza filtrada.....36

Figura 17. Tanque de cabeza y cola.....37

Figura 18. Estación de mezcla de tierras y preparación de aditivos.....38

Figura 19. Planta de carbonatación de cerveza.....38

Figura 20. Factor de fricción para diferentes Numero de Reynolds.....41

Figura 21. balance de fuerzas en una partícula esférica en equilibrio en un medio continuo.....42
Figura 22. Centrifugas sedimentadoras. a) Tubular y b) De tazón sólido.....46
Figura 23. Centrifugas de tazón triple.....48
Figura 24. Centrifuga de cámara múltiple.....49
Figura 25. Centrifuga decantadora.....50
Figura 26. Centrífugas de discos. a) Retención de sólidos. b) Tazón abierto.....51
Figura 27. Centrífuga de discos. a) Esquema de diseño y b) Pila de discos.....53
Figura 28. Perfil de velocidades en una centrífuga de discos.....54
Figura 29. Equipo Viscosímetro de bola Stokes.....64
Figura 30. Centrifuga de botellas.....66
Figura 31. A la izquierda: balanza analítica. A la derecha: muestra de cerveza no filtrada a analizar.....66
Figura 32. A la izquierda: muestras de cerveza filtradas para anlizar tubidez. A la derecha: equipo Turbidímetro nefelométrico.....67
Figura 33. Esquema de zona de centrifugación en simulación CCU.....69

Figura 34. Simulador de centrifugación bajo la modalidad calidad de cerveza constante.....70

Figura 35. Simulador de centrifugación bajo la modalidad tiempo de proceso constante.....71

Figura 36. Comportamiento de la densidad de los caldos madres.....73

Figura 37. Curva turbidez vs recuento celular de levaduras para el caldo madre 11

.....77

Figura 38. Curva turbidez vs porcentaje peso de sedimentos en cerveza para el caldo madre
4.....78

Figura 39. Curva turbidez vs volumen filtrado por lote.....78

Figura 40. Distribución normal de recuentos de concentración de levaduras en cerveza previa a la filtración.....79

Figura 41. Centrifuga BRPX714, a la izquierda centrifuga vista en corte longitudinal, a la derecha centrifuga operativa en montaje.....81

Figura 42. Estimación del número de lotes mensuales en la situación actual, en el eje de abscisas los meses del año.....83

Figura 43. Estimación del número de lotes mensuales con centrifuga, en el eje de abscisas los meses del año.....84

Figura 44. Estimación del número de lotes mensuales ahorrados, en el eje de abscisas los meses del año.....84

Figura 45. Esquema de comparación de tiempos de proceso de filtro de velas. Arriba caso base actual. Abajo caso con centrifuga.....86

Figura 46. Valores convencionales de tasa de descuento en función del riesgo.....89

Figura 47. Potencia eléctrica consumida en función del flujo de proceso de la centrifuga BRPX 714.....90

Figura 48. Resumen balance de tierras diatomeas Kieselguhr; se muestran dosificación base (proyecto defensor) y dosificación con centrifuga (proyecto retador) 92

Figura 49. Flujo de caja proyecto retador.....93

Figura 50. Variación del Valor Actual Neto (VAN) en función de la variación porcentual de la tasa de descuento (td).....95

Figura 51. Variación de la Tasa interna de retorno (TIR) en función de la variación porcentual de la producción total anual.....95

Figura 52. Variación del periodo de pago (PAYBACK) en función de la variación porcentual del tiempo de utilización de la centrifuga.....96

Figura 53. Variación del Valor Actual Neto (VAN) en función de la variación porcentual del precio de compra de tierras Kieselguhr.....96

Índice de Tablas

Tabla 1. Valores típicos de factor Sigma para diferentes tipos de centrifugas ……59

Tabla 2. Densidades promedio de los caldos madres CCU……73

Tabla 3. Viscosidades dinámicas de los distintos caldos madres antes de paso por enfriadera……74

Tabla 4. Viscosidades dinámicas de los distintos caldos madres después de paso por enfriadera……74

Tabla 5. Factores Sigmas requeridos para cada caldo madre antes de paso por enfriadera……85

Tabla 6. Factores Sigmas requeridos para cada caldo madre después de paso por enfriadera……85

Tabla 7. Promedio (μ) y desviación estándar (σ), valores en millones de células/mL ……79

Tabla 8. Valores de promedio y desviación estándar una vez eliminados anomalías del set de datos……80

Tabla 9. Proyección de la demanda de cerveza CCU planta Temuco; 2018 ……82

Tabla 10. Tiempo de proceso filtro de velas: situación actual……85

Tabla 11. Indicadores económicos proyecto retador……94

Capítulo I
INTRODUCCIÓN

Capítulo I: Introducción

1.1 Contexto: Elaboración de la cerveza

La historia de la cerveza se basa en las antiguas civilizaciones que poblaron el mundo, el proceso consiste básicamente en moler un cereal germinado, para luego mezclarlo con agua. Este líquido es filtrado para cocerlo, momento en el cual se le agrega lúpulo y posteriormente se añade la levadura para que fermenten los azúcares y se consiga el alcohol necesario. El principio es el mismo en todas las cerveceras, donde las materias primas básicas son el agua, el cereal, el lúpulo y la levadura. La cerveza es una bebida que se obtiene mediante diferentes técnicas y procedimientos, las cervezas más destacadas son: Ale, Lager o Pilsen, Blanca, Stout, en la Figura 1 se presenta la línea de cervezas producidas por Cervecerías CCU.

La cerveza está elaborada con una gran cantidad de agua, lo que resulta una buena forma de colaborar con el consumo diario del ser humano, el cual se encuentra entre 2 a 3 litros diarios, pero desfavorablemente el agua que contiene la cerveza en combinación con los minerales disueltos, el dióxido de carbono (CO_2), y la temperatura fría de ésta, calman la sed haciendo que el consumidor deje de beber líquido.

Cantidades mayores de alcohol conducen a la embriaguez, ante la cual cada persona reacciona de forma distinta.

Figura 1. Productos CCU línea cervecería

1.2 Definición del problema y fundamentos de la Memoria

La situación actual del panorama de filtración de cervezas en CCU Temuco, contempla básicamente el paso de la cerveza por 3 equipos de filtración; primeramente el filtro de tierras Kieselguhr, el cual utiliza como medio filtrante tierras de diatomeas; estas tierras tienen la particularidad que no son reutilizables, es decir una vez utilizadas en el lote de filtración, deben ser depositadas en silos de desecho de tierras y posteriormente retiradas por organismos especializados que se encargan de su tratamiento; este equipo (filtro de tierras), es el equipo encargado de remover casi la totalidad de la turbidez aparente adquirida durante todo el proceso que antecede a la filtración, es decir etapas de cocimiento y fermentación.
Una vez filtrada la cerveza en el filtro de tierras, corresponde el paso al filtro PVPP (Polivinilpolipirrolidona), equipo que es encargado de remover el velo coloidal que pudiese generarse luego en el proceso de pasteurización de la cerveza, este equipo brinda la estabilidad biológica de la cerveza.
Finalmente, la cerveza pasa a través del filtro Trap (filtro pulidor) que es el equipo encargado de remover cualquier tipo de partícula que haya pasado durante la etapa de filtración previa.

La eficiencia del proceso de filtración recae totalmente en la funcionalidad que tenga el filtro de tierras en el proceso; éste es el equipo que define cuanta cantidad de producto es la que se obtendrá en el lote de filtración; dicho esto, el filtro de tierras resulta ser el equipo crítico de la filtración CCU, el aumento de presión no controlado al interior de éste, origina una filtración deficiente, más aun cuando no se cuenta con una cerveza con estándares de calidad normalizados previos al paso del equipo, esto hace llegar rápidamente a la máxima Presión del filtro (6,5 bares), esto recae en que la operación de filtración debe ser interrumpida inmediatamente, pasando a la etapa de empujes finales de cerveza, enjuagues y limpiezas.

La situación actual del área de filtración de la cervecería no cuenta con estándares claros de calidad del producto antes de ser filtrado; la cantidad de cerveza clarificada obtenida en cada lote de filtración es muy variable, puesto que las variables de proceso como Turbidez, concentración de sólidos, vienen prácticamente, en su totalidad de manera aleatoria, originan lotes de filtración poco eficientes, donde en muchos casos el tiempo empleado recala casi en su totalidad en etapas de preparación de filtración, preparación y consumo de aditivos e insumos, lavados, esterilizaciones y limpieza de los equipos, y se pierde el objetivo principal de la filtración; obtener la mayor cantidad de cerveza con los estándares de calidad exigidos.

En base a esto, se propone una solución técnica de modificación del esquema de filtración; añadiendo un filtro centrifugo al sistema, que logre remover las levaduras no floculadas en el proceso de fermentación, y mejorar la duración de los ciclos de filtración del proceso de elaboración de cerveza.

1.3 Objetivos de la memoria

1.3.1 Objetivo general

El objetivo general de la memoria es evaluar la viabilidad técnica y económica de implementar al proceso productivo actual, un separador centrífugo que logre reducir significativamente el tiempo de los ciclos de filtración, así como también minimizar el consumo de aditivos y tiempos muertos de mantención y preparación del filtro de tierras Kieselguhr.

1.3.2 Objetivos específicos

Los objetivos específicos son:

- Caracterizar física y químicamente los distintos tipos de caldos madres (cervezas) en función de variables que influyen en la filtración de éstas; turbidez, porcentaje de levaduras, concentración de sólidos en suspensión.
- Determinar qué área del proceso de filtración es más efectiva la justificación de implementación del separador centrífugo.
- Diseñar simulador de proceso asociado al área de centrifugación, utilizando los resultados obtenidos experimentalmente y criterios prácticos operacionales.
- Realizar evaluación económica de las alternativas mediante análisis económico de proyectos de remplazo (análisis incremental).

Capítulo II
ANTECEDENTES

2.1 Materias Primas Fundamentales

Para la fabricación de cerveza se necesitan cuatro ingredientes fundamentales: la cebada, el lúpulo, el agua y la levadura. Existe la posibilidad de ocupar otro cereal como adjunto a la malta. La calidad de estos ingredientes tiene una influencia decisiva sobre la calidad de la cerveza. La utilización de la cebada se basa en el hecho de que tiene un alto contenido de almidón y que la cáscara sigue adherida al grano después de la trilla y de haber sido procesada para ser trasformada en malta. El lúpulo le da el sabor amargo a la cerveza y tiene influencia sobre su aroma. La mayor porción de la cerveza es agua, por esta razón se necesita en abundancia y de diferentes calidades, ya sea, agua potable, agua blanda y agua cervecera. Gracias a la levadura existe una fermentación alcohólica necesaria para trasformar el azúcar en alcohol y dióxido de carbono. ***(Kunze, 2006)***
A continuación, se explicará más detalladamente cada uno de los principales componentes de la cerveza.

2.1.1 Cebada: La cebada suministra el almidón necesario, el cual en la sala de cocimiento es transformado en azúcares fermentables. En la calidad de la cebada influyen las condiciones en las cuales se obtiene como: el clima, el suelo, los abonos, el sistema de cultivo y el procedimiento de recolección.

En la figura 2 se ve la cebada plantada, lista para cosechar, pero aún no se puede ocupar en la elaboración de cerveza (para la cerveza elaborada en CCU). Para ello se debe someter a la cebada a un proceso de malteado, el cual consiste en la transformación controlada de grano a través de la germinación y el tostado. De esta forma se activan las enzimas contenidas en ella, con la finalidad de prepararlas para el proceso de maceración.

Figura 2. Plantaciones de cebada cervecera. Fuente: agroterra.com

En la figura 3 se observa un grano de cebada de tal forma que se diferencian cinco zonas principales:

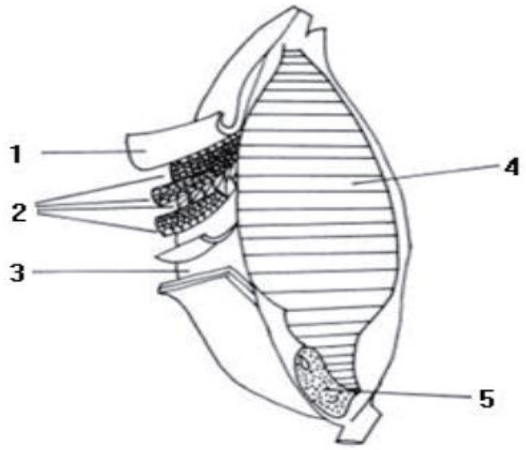


Figura 3. Grano de cebada en corte longitudinal. Fuente: productosdelcampo.store

Zona 1: Es la cáscara protectora, contiene glucanasa, proteínas, resinas amargas y taninos.

Zona 2: Capa del fruto (pericarpio), capas de semilla interior y exterior (testa) son Semipermeables, cubren todo el grano y contiene lípidos.

Zona 3: Esta capa se llama aleurona y contiene enzimas y lípidos.

Zona 4: Se llama endospermo, es la estructura más importante de la cebada y constituye la mayor parte del grano. Su principal componente es el almidón. Los gránulos de almidón se encuentran rodeados con una matriz proteica. El almidón está constituido por dos compuestos: la amilosa que tiene estructura lineal y la amilopectina de estructura ramificada. Un 30% del almidón está formado por amilosa y se considera que el 70% restante lo ocupa la amilopectina.

Zona 5: Se llama germen y es la parte del grano donde se produce la mayor absorción de agua. Es una estructura viva que contiene una gran cantidad de proteínas y ácidos nucleicos. Durante la germinación, las reservas alimenticias del endospermo son utilizadas para el crecimiento.

La cebada al ser un producto orgánico nunca es la misma, por esto es importante saber la composición de ésta. La cantidad de agua es de un 14 a 15% en promedio. Puede variar de 12% en una cosecha muy seca y un 20% en una cosecha muy húmeda. La cebada muy húmeda corre un riesgo, en lo que respecta a su capacidad de almacenamiento y de germinación, y debe ser secada. La cebada apta para el almacenamiento debe tener un contenido menor a un 15% de agua. El contenido restante se denomina materia seca la cual está conformada por hidratos de carbono, proteínas, minerales, grasas y otras sustancias.

2.1.2 Lúpulo: El lúpulo es una planta trepadora que pertenece al grupo de las urticáceas y la familia cannabácea (figura 4). Los componentes principales del lúpulo son: los alfa-ácidos, beta-ácidos, resinas y aceites esenciales. En la fabricación de cerveza se utilizan únicamente las inflorescencias de las plantas femeninas, éstas contienen las resinas amargas y los aceites etéreos que le suministran a la cerveza los componentes amargos y aromáticos. Dicho de otra forma, el lúpulo es un estróbilo seco de la planta de lúpulo femenina.

Figura 4. Planta de lúpulo. Fuente: fuentesaludable.com

Durante el proceso de cocción, el aceite de lúpulo se volatiliza de forma progresiva. Es por esto que la adición del lúpulo dependerá de cada cervecera, dependiendo del tipo de cerveza que se está fabricando (se adiciona más tardíamente el lúpulo en la cocción para tener al menos una conservación del aceite de lúpulo aromático). La composición del lúpulo tiene una gran influencia en la calidad de la cerveza.

2.1.3 Agua: Cuantitativamente, el agua es la mayor porción de materia prima usada para la fabricación de cerveza, sin embargo, solamente una parte de la cantidad de agua requerida es usada directamente en la cerveza, mientras que otra parte se requiere para limpieza, enjuague y otros propósitos. La obtención y el tratamiento del agua son de particular importancia para el cervecero, dado que la calidad de la cerveza también depende de la calidad del agua.

El consumo total de agua varía ampliamente dependiendo de la forma racional como se use y de las recuperaciones que se lleven a cabo. En cervecería el valor del consumo de agua total es de aproximadamente 10 hl/hl de cerveza envasada. Dentro de la empresa se distinguen tres tipos de aguas diferentes: el agua potable (consumo humano, casino, baños, riego, etc.), el agua blanda (utilizada para disminuir las incrustaciones en las calderas, intercambiadores de calor y todo equipo que tenga contacto con el agua) y el agua cervecera (que se utiliza en la elaboración de la cerveza).

El agua utilizada para el proceso de fabricación de cerveza no sólo debe satisfacer los requerimientos generales del agua potable; también debe cumplir ciertos requerimientos específicos que permitan asegurar un pH adecuado, una extracción de lúpulo correcta, la buena coagulación en la paila de cocción, una fermentación óptima y para garantizar el buen color y sabor de la cerveza. ***(Asociación de Maestros Cerveceros de las Américas, 1997)***

2.1.4 Levadura: La levadura cervecera es un hongo unicelular, de la familia Saccaromycetaceae. Este microorganismo tiene la capacidad de descomponer diversas sustancias orgánicas, principalmente azúcares y carbohidratos, mediante el proceso de la fermentación ***(Fernow, 2012)***. En la figura 5 se muestra la estructura de una levadura la cual está envuelta por una membrana exterior denominada pared celular. La membrana celular permite, al ser semipermeable, la entrada de nutrientes y sustancias disueltas en el agua, siendo evacuados el CO2 y el alcohol. La membrana celular regula mediante procesos osmóticos, la igualdad entre el medio intracelular y extracelular. La presión osmótica es proporcional al número de moléculas disueltas en el agua, así pues, cuanto mayor sea el contenido en azúcar, la cantidad de agua de la disolución es menor, aumentando la presión osmótica. Esto explica por qué cuando en la formulación del mosto el contenido en azúcar es alto, la actividad fermentativa queda reducida.
El citoplasma es la parte fundamental de la levadura (célula) y contiene:

- Un núcleo donde se encuentran los cromosomas (determinante de las propiedades Hereditarias).

- Vacuolas donde se encuentran las reservas de grasas.

- Mitocondrias que permiten el abastecimiento de energía a la célula.

- Ribosomas donde se elaboran proteínas.

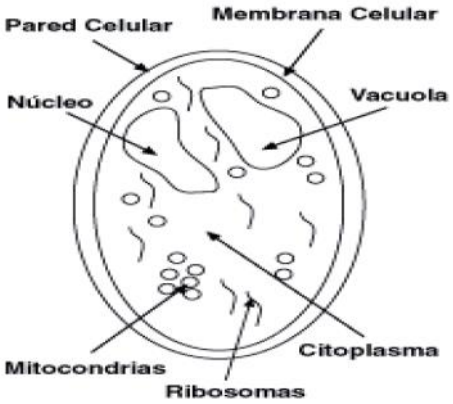


Figura 5. Estructura de una levadura. Fuente: Kunze 2006

La reproducción de las levaduras se desarrolla de dos formas: asexuada a través de gemación y por reproducción sexual. La reproducción por gemación es la forma más

común y es un proceso en el cual la llamada célula madre desarrolla una pequeña ampolla que va aumentando de volumen hasta separarse convirtiéndose en una célula hija (una sola célula de levadura puede generar 25 células hijas). En la figura 6 se muestra la reproducción por gemación. La reproducción sexual sucede cuando dos células de distinto sexo se han separado de su progenitora, se unen, procrean y se vuelven a separar.

Figura 6. Reproducción de una levadura. Fuente: cordis.europa.eu

La levadura cervecera tiene dos formas de vida, según el medio en el que se encuentre: puede vivir en ausencia de aire (anaeróbicos) o en presencia del aire (aeróbicos).

La fermentación de la levadura se puede dividir en dos reacciones: la fermentación propiamente tal y la reacción de respiración, pero éstas se solapan entre sí. Cuando la levadura dispone de poco oxígeno, como cuando se encuentra en el mosto, utiliza los azúcares para producir la energía necesaria para el mantenimiento de su vida, provocando una reacción en cadena denominada "fermentación", en el curso de la cual los azúcares son transformados en alcohol y dióxido de carbono (CO2). Esta reacción se puede observar en la siguiente ecuación.

$$\boldsymbol{LEVADURA + AZÚCAR \rightarrow CO_2 + ALCOHOL}$$

Cuando la levadura se encuentra en presencia de aire (oxígeno) se produce la oxigenación de los azúcares transformándolos en masa celular, agua, CO2 y la energía necesaria para la vida y desarrollo de las levaduras. Esta reacción se denomina "respiración" la cual se observa en la siguiente ecuación.

$$\boldsymbol{AIRE + LEVADURA + AZUCAR \rightarrow CO_2 + AGUA + ENERGÍA}$$

Adjunto (arroz): Las materias primas auxiliares o adjuntos tienen importancia en la fabricación de cervezas claras por su almidón, lo mismo que el almidón de la cebada, pero contribuyen poco al color, sabor, aroma y contenido de proteínas. Se ocupa en la elaboración de cerveza por su bajo costo en comparación con la malta. En este caso, el arroz es una muy buena fuente de almidón, por ende, es muy rico en extracto. En

cervecerías se emplea principalmente el gritz de maíz, puntas de arroz, y/o cebada sin germinar, pudiéndose emplear también sorgo y trigo. En CCU Chile se ocupan las puntas de arroz como adjunto.

El añadir arroz adjunto trae consigo importantes ventajas en la producción de la cerveza, tales como una disminución en los costos, un color más claro en la cerveza, más refrescantes, con mejor estabilidad física y mejor comportamiento ante el enfriamiento. ***(Kunze, 2006).***

2.2 Descripción general Elaboración CCU

El proceso de elaboración de la cerveza en cervecera CCU consta de tres áreas principales: cocimiento, fermentación y filtros; para luego pasar al área de envasado.

2.2.1 Etapa de cocimiento

El área de cocimiento cuenta con una sección de recepción de granos, donde llegan los granos de malta cebada y arroz ya sean en camión o ferrocarril, los cuales tienen un proceso de limpieza distinto y en paralelo.

El proceso comienza en esta etapa con la recepción de granos de malta cebada proveniente de distintas partes del país y del mundo; además se recibe arroz que se utiliza en el proceso.
Una vez recepcionados los granos, se continúa con la limpieza, la cual es distinta para la malta y el arroz.

Para la malta en una primera etapa, mediante un sistema de tamiz y centrifuga, se le retira la pajilla y el polvo que ésta traiga lo que posteriormente se desecha y la malta se carga en los silos, de los cuales 6 son destinados a la malta utilizada para la fabricación de cerveza nacional, con una capacidad de 630 [ton] cada uno, otros 2 silos de 260 [ton] cada uno, son de malta para elaboración Heineken.

El arroz en cambio se almacena en silos de 500 y 275 [ton] para después ser limpiados de impurezas metálicas y no metálicas.
Una vez completado el proceso de limpieza de granos, se comienza a dosificar el arroz y la malta por separado, mediante una balanza romana que proporciona batchs de 50 kg y 100 kg respectivamente, para así pasar a la etapa de molienda, el arroz se somete a una molienda seca, en un molino de dos rodillos; por otro lado, la malta se procesa en un molino de seis rodillos y además se le agrega agua a 60ºC para hacer más eficiente el proceso. Dichos molinos tienen una capacidad de 5 y 20 [ton/h] respectivamente.

Posteriormente el arroz se somete a una pre-maceración con la finalidad de degradar todo el almidón y dejar todo en solución acuosa. Esto se logra con vapor, el cual aporta hasta 100ºC de temperatura y 5 [bar] de presión, y la adición de una enzima llamada α-amilasa.

Por otra parte, la malta se pasa directo a los maceradores, en donde se le adiciona la enzima β-glucanasa con la finalidad de romper las paredes celulares del germen de la malta y poder acceder a los azucares del grano. Luego de esto, se procede a mezclar las soluciones de arroz y malta en los maceradores.
Esta mezcla y maceración se lleva a cabo mediante la siguiente curva de maceración, la cual se muestra en la figura 7, el proceso de adición de calor se realiza de manera escalonada desde el minuto 70 hasta el minuto 150 aproximadamente.

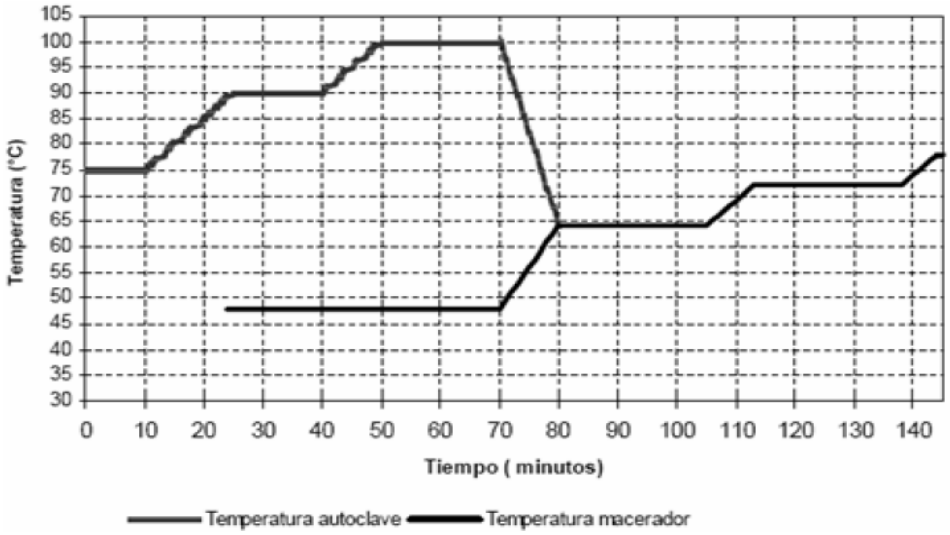


Figura 7. Curva de maceración del arroz y Malta. Fuente: Manual de elaboración Cervecerías Unidas 2017.

Esta solución que se obtiene se conoce con el nombre de caldo madre (CM), en esta planta se producen 5 caldos madres: CM2, CM4, CM7, CM8, CM11. Cada uno de estos "caldos madres" y con un procesamiento adecuado produce una pinta distinta de cerveza, siendo destinado para la producción de Heineken solo el CM8.

De acuerdo con el CM que se haya producido, es el volumen de caldo frio que se produce para la siguiente etapa (600 o 700 HL).
Una vez concluida la maceración se pasa la mezcla con restos de malta (orujo, proteínas no disueltas) a la etapa de filtros. Estos filtros llamados filtros Lauter, constan de un estanque con un fondo con orificios (fondo falso), además son agitados lentamente, mediante barras verticales en zigzag. El líquido procesado se recircula, acumula y pasa a la siguiente etapa de acuerdo al programa enviado por la gerencia técnica para la recirculación de un caldo madre especifico. Los sólidos obtenidos en esta etapa, son retirados de los filtros una vez realizado el batch, y llevados a silos de orujo, donde posteriormente son retirados en camiones para su venta como alimento de animales.

El líquido obtenido de los filtros se llama, a partir de este momento mosto, una solución rica en azucares y proteínas no disueltas a una temperatura de 78ºC. Antiguamente, este líquido se pasaba directamente a los cocedores, en donde se elevaba su temperatura hasta la ebullición; sin embargo, se realizó un aprovechamiento de energía mediante el aprovechamiento del vapor usado en la cocción para el pre calentamiento de este mosto. Para dicho efecto, se utiliza un intercambiador de placas, donde por un lado se hace pasar mosto y por el otro extremo, agua caliente del circuito cerrado de aprovechamiento de energía; el cual consta de un intercambiador de tubos y carcasa en donde se calienta el agua con el vapor proveniente de los cocedores y un estanque almacenador de agua caliente.

A continuación, se realiza la cocción del mosto, etapa en la cual, mediante la adición de calor, lúpulo (sustancia que le da el sabor amargo a la cerveza) y ácido fosfórico, se concentra el extracto (16ºP), se isomeriza el lúpulo, y esteriliza la solución. Esta etapa dura aproximadamente 70 minutos.

El mosto se hace pasar por unos equipos llamados Whirpool, en donde se inserta la mezcla de forma tangencial en el equipo cilíndrico con fondo cónico, con el fin de aprovechar la fuerza centrífuga y decantar las proteínas en suspensión que quedan en el mosto. Estas proteínas son llamadas Trub. Este Trub es recirculado a los filtros Lauter, en donde ayudan al proceso de filtrado y aportan con extracto al mosto en dicha etapa.

Una vez completada la etapa de Whirpool se procede a enfriar el mosto desde 90ºC a 10ºC aproximadamente en un intercambiador de placas.

Una vez enfriado el mosto, se le inyecta aire estétil hasta alcanzar una concentración de 14 a 16 ppm de oxígeno para que tenga la cantidad óptima para la propagación de la levadura.

2.2.2 Etapa de fermentación

Concluida la inyección de aire estéril y con la cantidad optima de oxígeno para la propagación de la levadura, comienza la etapa de fermentación del mosto para pasar a llamarse cerveza.

Esta etapa consta de los siguientes estanques:

Tanques fermentadores TCC: Tanque cilíndrico-cónico

- 24 unidades, conos refrigerados con capacidad de 3200 HL
  Utilizados para cervezas CCU, eventualmente Heiniken.

- 4 unidades, tanques HORAPS con capacidad de 2800 HL
  Utilizados exclusivamente para cerveza Heiniken.

Tanques fermentadores y Reposo UT: Uni –Tank

- 12 unidades, cono aislado y capacidad de 3200 HL.

Sus llenados demoran 6-7 horas y se recepcionan 3 cocimientos (con alrededor de 2100 HL).

En esta etapa se hace la diferencia en la producción de cerveza CCU y cerveza Heiniken, por lo que se destina toda una sección exclusivamente para la producción de esta última.

Según la programación de gerencia técnica y/o jefes de área, es el tipo de caldo madre que se hace, el cual define la pinta de cerveza que terminara siendo.

Para la fermentación se utiliza una cepa de levadura llamada Saccharomyces Uvarum (o S. Carlsbergensis). Esta levadura se propaga, primeramente, en el laboratorio de microbiología, eligiendo las células que estén en mejores condiciones para propagarlas en 10 mL de mosto. Al mismo tiempo, proveniente del área de cocimiento, se mezcla en un estanque propagador, 150 HL de mosto, con 75 litros de mosto con cepas de levadura propagada en el laboratorio de microbiología. Esta propagación demora entre 48 a 56 horas. Sin embargo, este procedimiento se realiza cada semana por medio, debido a que dicha levadura, se reutiliza hasta un máximo de 4 veces.

Una vez concluida la propagación antes mencionada, se procede a llenar un estaque TCC con 3 cocimientos y estanque propagador para llevar a cabo la fermentación. Manteniendo siempre el mosto a una temperatura de 10ºC aproximadamente, se mantiene en esos estanques aproximadamente 7,5 días, sin embargo este no es el parámetro a medir, una vez que el grado Plato (ºP) baja hasta 2,8 y comienza a repetirse este valor (tres veces aproximadamente), se procede a realizar una purga de 1 HL

aproximadamente para así realizar la primera cosecha de levadura que servirá para una siembra posterior en un estanque fermentador, además se extraen muestras para laboratorio para analizar las cantidades de diacetilo (butanodiona y pentanodiona) componentes que le dan mal sabor a la cerveza, y de alcoholes superiores (productos indeseables en la fermentación), hecho esto, se puede continuar con la siguiente etapa de reposo.

La cosecha de levaduras, se envía hacia los estanques de levadura, los cuales desactivan estos microorganismos mediante la reducción de la temperatura (hasta 5 ºC) para ser tratadas e inoculadas nuevamente en un estanque fermentador (TCC).

2.2.3 Etapa de filtración

Una vez concluido su reposo, ya se puede llamar cerveza. Sin embargo, esta contiene mucho material biológico y proteínas en suspensión, por lo que debe pasar por una etapa de filtrado.
A pesar de que ya se le haya controlado la adición de lúpulo, el extracto con el que llega a esa etapa y algunas otras propiedades de sabor y color, se le ajustan nuevamente estos parámetros, mediante la adición de lúpulo, CO_2, y caramelo.

En la etapa de filtrado se hace pasar la cerveza con tierras diatomeas por un filtro de velas, el cual corresponde a un estanque que tiene en su interior una cierta cantidad de tubos formados por muchos anillos pequeños. Entre ellos es donde pasa la cerveza filtrada.
La cerveza, previamente diluida y enfriada a temperaturas bajo cero con amoniaco, según la pinta que se esté elaborando, se le inyecta la tierra en línea y es propulsada por una bomba de caudal variable, ya que en un principio se debe formar la precapa de tierra con un caudal determinado (975 HL/h), con cierto espesor requerido a diferencia del caudal de filtración que es 650 HL/h.

Luego de pasar por el filtro de velas, se utiliza un nuevo filtro que usa un polímero llamado poli-vinil-poli-pirrolidona (PVPP). La decisión de pasar o no la cerveza por este tipo de filtro, se realiza en la sala de control mediante la apertura o cierre de válvulas y en terreno modificando el orden de líneas en el panel de tubería.
A continuación, habiendo pasado por los filtros PVPP, se le hacen los ajustes de caramelo y lúpulo.

Caramelo: jarabe espeso de color ambar, producto de reacciones por caramelización por temperaturas, oxidaciones enzimáticas y no enzimáticas. Los colorantes utilizados son: malta caramelo, malta negra y color caramelo.

Luego de los ajustes de aditivos, hay un juego de válvulas el cual permite, en caso de filtración de tierras en la cerveza o incidentes parecidos, hacer pasar la cerveza por un nuevo filtro llamado Filtrap, de características similares al primer filtro.
Una vez alcanzado los estándares de sabor y color, se realiza la primera carbonatación de la cerveza en línea en un juego de tuberías en forma de zigzag para asegurar la homogeneización de la mezcla. El gas CO_2 se inyecta a 1 bar de presión controlado desde la sala de control.

La cerveza una vez carbonatada esta lista para ser enviada al área de envasado, donde se le hacen ensayos de sabor, color, carbonatación, etc., y de acuerdo a esto, se le añade la cantidad necesaria de CO_2 para que cumpla con la norma vigente y poder ser envasado.

2.3 Proceso de filtración CCU

La filtración tiene por objeto fundamental obtener una cerveza brillante mediante separación y retención sobre los elementos filtrantes de las sustancias responsables de la turbidez de la cerveza.

Tales sustancias están principalmente compuestas por partículas sólidas en suspensión, tales como: levaduras y eventualmente otros microorganismos, así mismo sustancias de naturaleza coloidal de tamaño micelar bastante voluminosas causantes de un velo más fino y responsable de una inestabilidad de la cerveza.

La filtración persigue, por lo tanto:

- Abrillantar la cerveza
- Estabilizar la cerveza biológicamente.
- Estabilizar coloidalmente la cerveza.

Estos efectos se consiguen durante la filtración mediante:

- Acción mecánica: efecto de tamizado que consiste en retener las partículas que por su tamaño son incapaces de atravesar la superficie libre de filtración (porosidad)
- Acción físico química: Efecto de adsorción que permite retener las sustancias de tipo coloidal e incluso molecularmente disueltos en razón de cierta afinidad química o por atracción de cargas eléctricas opuestas.

En la figura 8 se muestra un diagrama de bloques de las principales etapas del proceso de filtración, además de los principales aditivos e insumos usados en cada equipo

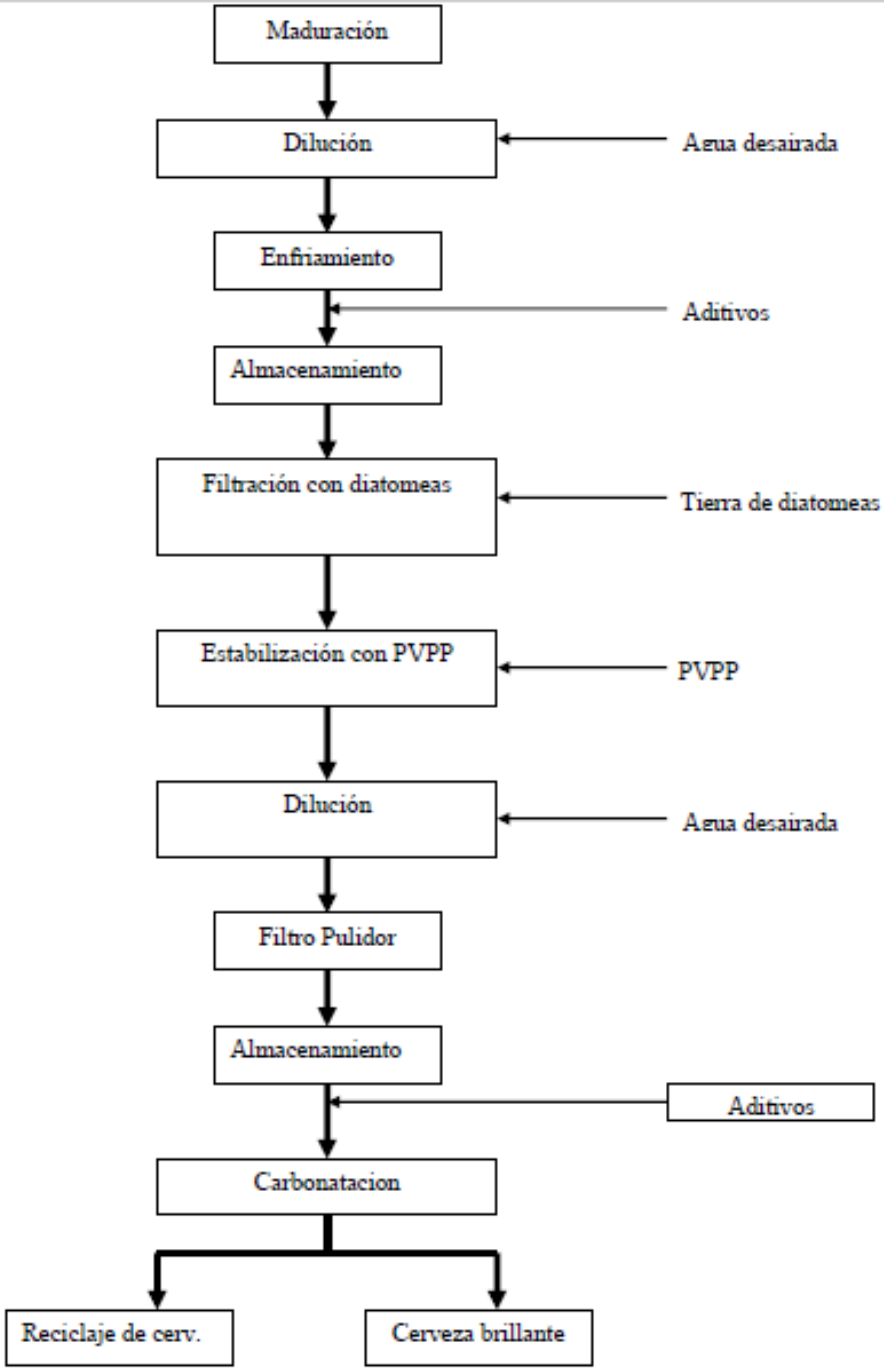


Figura 8. Diagrama de bloques del área de filtración. Fuente: Manual de elaboración cervecerías Unidas 2017.

2.3.1 Dilución o Normalización

El objetivo de la dilución, es la modificación del contenido de extracto de la cerveza concentrada para obtener las características de la cerveza deseada, a través de la incorporación del agua de dilución.

2.3.2 Filtración con diatomeas

La filtración es una operación en la cual una mezcla heterogénea de un fluido y de partículas sólidas se separan en sus componentes, con el auxilio de un medio filtrante "diatomeas" que permite el paso del fluido y retención de las partículas sólidas.
La tierra de diatomeas son los restos esqueléticos de plantas microscópicas que fueron depositados en los fondos de mares y de lagos hace millones de años.
Actualmente se extraen de grandes depósitos del tipo tiza, se muelen hasta lograr un polvo que es esterilizado y calcinado a 800 – 900 °C y clasificado en grados de diverso tamaño. Hoy es el principal material filtrante.

2.3.3 Estabilización con PVPP

Las técnicas que evitan y reducen la formación de velo coloidal en el envase se denominan resistencia al enfriamiento o estabilización de la cerveza.
Las diversas técnicas empleadas para dar a la cerveza resistencia al enfriamiento intentan ya sea eliminación de la proteína y/o tanino de la cerveza o hacer que la proteína o tanino sea incapaz de formar el complejo del velo coloidal.
El PVPP (polivinilpolipirrolidona) es absorbente eficaz de taninos. Las moléculas de tanino son electrostáticamente atraídas por el absorbente para formar una masa floculosa que precipita de la cerveza. Al eliminarse el tanino de la solución, la proteína restante no tiene nada con que poder formar un complejo, eliminándose así la formación de velo coloidal. La reacción de absorción es bastante rápida.

2.3.4 Carbonatación

Sistema de control que vigila el nivel de carbonatación de la cerveza. En dicho sistema, se inyecta dióxido de carbono adicional dentro de la cerveza a medida que es transferida, y se mide el nivel de carbonatación, de acuerdo a los resultados se reajusta la válvula de control de flujo del dióxido de carbono.

2.4 Principales equipos usados en el área de filtración

2.4.1 Tanque buffer de alimentación de filtro.

Su finalidad es prevenir prácticamente toda alza o fluctuación de presión.
El control del flujo de alimentación al filtro deberá ajustarse según el nivel del tanque buffer. El filtrado constante está asegurado por el control de flujo de la bomba transportadora de cerveza al filtro de tierras. En la figura 9 se puede apreciar una vista lateral del tanque buffer, su capacidad es de 350 HL.

Figura 9. Tanque Buffer de alimentación a filtro de tierras. Fuente: Planta de elaboración CCU Temuco, 2018

2.4.2 Filtro de velas

En este tipo de filtro los elementos de soporte de filtración van montadas en un recipiente cilindro cónico vertical.
El tanque está compuesto de 2 partes separadas por una placa intermedia situada en la parte superior del filtro, sobre la placa van montadas las velas o bujías de filtración.
Las bujías están constituidas por un tubo de acero inoxidable perforado alrededor del cual esta enrollado y soldado un fino alambre calibrado de acero. Todo en inoxidable especial. El espacio libre entre los hilos de acero “bobinado” sobre el tubo es de 50 micras de paso por las que atraviesa el medio clarificado.

La cerveza sin filtrar entra en la parte inferior y la cerveza filtrada sale por el domo, en la figura 11 se muestra un esquema del flujo de proceso del filtro de velas, en la figura 12 se aprecia el flujo de cerveza dentro de la vela.

La capacidad depende entonces del número de bujías y de la longitud de las mismas. Puesto que la bujía es bastante fuerte, el filtro puede soportar presiones considerables sin que se afecte la filtración, en la figura 10 se muestra una vista lateral del filtro de velas, en la parte inferior la entrada de cerveza sin filtrar.

Figura 10. Filtro de tierras de diatomeas. Fuente: Planta de elaboración CCU Temuco, 2018

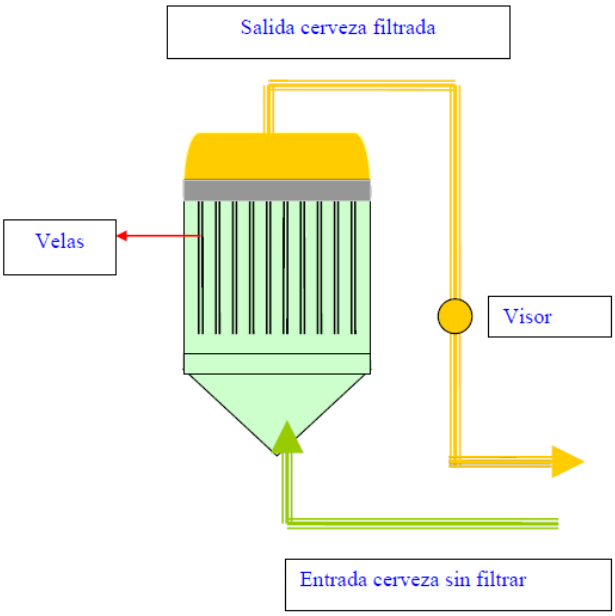


Figura 11. Flujo de cerveza en el filtro de diatomeas. Fuente: Manual de elaboración cervecerías Unidas 2017.

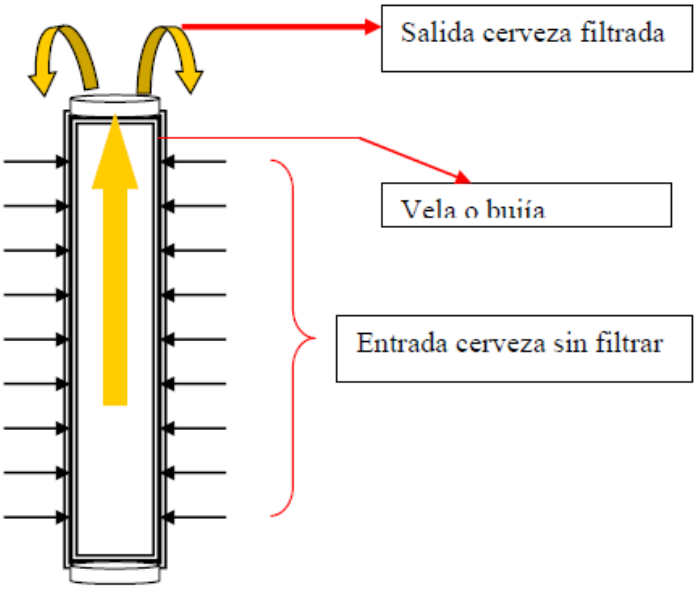


Figura 12. Flujo de cerveza en la vela. Fuente: Manual de elaboración cervecerías Unidas 2017.

2.4.2.1 Operación filtro KG (Kieselguhr)

Se prepara una suspensión espesa de ayuda filtrante en agua, en un tanque de alimentación (dosificador). Se recircula esta suspensión por el filtro hasta que se forme en la vela una capa de tierra de aproximadamente 1 mm de espesor.

La primera precapa está constituida generalmente de 1000 a 1500 gr / m^2 de diatomeas de granulometría gruesa (ejemplo Hyflo).
Este primer aluvionaje primario grueso o medio, asegura las siguientes funciones:

- Protección del apoyo, es decir de la bujía o de la tela metálica que deben estar perfectamente limpia.
- Las partículas de diatomeas constituyen puentes sobre los poros del soporte. Estos puentes resultantes de partículas de gran tamaño del coadyuvante son más estables que las de tamaño fino. No se "desmoronan" fácilmente con los cambios que pueden existir por las variaciones de flujo o de presión ya que estas provocarían una variación momentánea de la turbidez.

A continuación, se prepara una segunda suspensión de ayuda filtrante (tierra más fina) y se recircula hasta que aclare el agua (0.3 a 0.5 °EBC) a esto se llama precapa.

Después se lleva al filtro la cerveza sin filtrar y se va inyectando tierra en forma continua a medida que va pasando la cerveza, la tierra dosificada continuamente a la cerveza se va depositando sobre la precapa renovando el lecho filtrante. La cantidad de tierra inyectada depende de la turbidez de la cerveza.

La filtración se efectúa por los espacios libres de la tierra. Llega un momento en que el material retenido y la tierra es muy grueso u aumenta la presión en el filtro. Cuando esta presión llega a 6.5 Bar se para la filtración.
Se pasa agua en contracorriente, para botar la tierra de las velas y se eliminan al tanque de tierras utilizadas.

2.4.3 Filtro de PVPP

Recipiente circular constituido por unos marcos circulares que en su interior llevan una malla metálica trenzada de acero inoxidable especial y cuya luz de paso es mínima (micras).

La disposición de las mallas soporte es de modo horizontal sobre un eje central que hace la función de colector de salida del producto filtrado.

Para la estabilización y regeneración se dispone de un aparato dosificador y una unidad de filtración.

Dicho equipo instalado entre el filtro de tierras de diatomeas y el filtro tamiz.

La cerveza previamente filtrada se le adiciona en proceso continuo la dispersión de Divergan RS (nombre comercial). La PVPP actúa con gran rapidez en la cerveza previamente filtrada, tiempo de contacto 4 – 5 minutos resultan suficientes para conseguir un buen grado de acción. La cantidad a emplear de PVPP oscila entre 30 y 50 gr/hl, según el efecto de estabilización que se desee obtener.

El estabilizador adicionado queda retenido en la unidad de filtración; en la figura 13 se muestra vista lateral de filtro PVPP, en su parte inferior posee un visor el cual permite a los encargados de proceso monitorear el estado de la reacción de filtración.

Al término de la filtración el equipo de estabilización se vacía con ayuda de CO2 a presión y la torta de estabilizante que queda sobre el filtro sometida a regeneración.

Figura 13. Filtro de PVPP. Fuente: Planta de elaboración CCU Temuco, 2018

La PVPP es regenerada a base de 2 soluciones cáusticas al 1 % de concentración, la primera se desecha después de su uso y la segunda se recupera. La torta de estabilizante que queda sobre el filtro se libera de las sustancias que haya podido adsorber, por lavado con agua y subsiguiente tratamiento con solución de hidróxido sódico.
Seguidamente, el Divergan RS se lava de nuevo con agua, se neutraliza con CO2 y se vuelve a introducir en el recipiente de dosificación.
El eje central puede girar y el PVPP sometido a un efecto de centrifugación para evacuarlo al dosificador.

2.4.4 Post filtro (pulidor)

También conocido como filtro pulidor, filtro tamiz o post filtro. Estos son mayormente filtros de cartuchos y deben tener la capacidad de retener partículas de tamaño menor que no fueron retenidas en el filtro de Kieselguhr y PVPP, en la figura 14 se aprecia filtro pulidor, posee 24 unidades de bujías filtrantes, y un área de filtración de 43,2 m^2, en la figura 15 esquema de flujo de cerveza en filtro pulidor, la entrada y salida de la cerveza se realiza por la parte inferior, donde a través de los cartuchos o bujías se retiene el material solido filtrado.

Figura 14. Filtro tamiz (filtro pulidor). Fuente: Planta de elaboración CCU Temuco, 2018

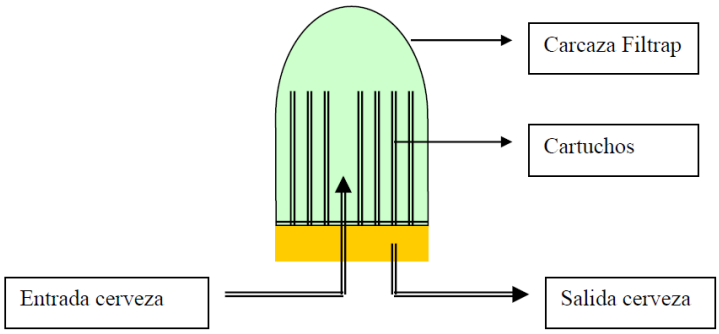


Figura 15. Flujo de cerveza en Filtro Pulidor. Fuente: Manual de elaboración cervecerías Unidas 2017.

2.4.5 Tanque buffer de filtrado

El control del flujo de la cerveza filtrada desde la sala filtración deberá ajustarse según los niveles del tanque buffer.
El filtrado constante está asegurado por el control de flujo de la bomba transportadora de cerveza a la sala de BBT, en la figura 16 se muestra una vista lateral del tanque de buffer de filtrado con una capacidad aproximada de 350 HL.

Figura 16. Tanque Buffer de cerveza filtrada. Fuente: Planta de elaboración CCU Temuco, 2018

2.4.6 Planta CIP

La planta CIP debe prestar especial atención en asegurar la máxima seguridad biológica. Una solución cáustica y un ácido son los únicos detergentes que se requieren en la sala de filtración.
Se usa él ácido para la esterilización en caliente de la línea filtración con el fin de evitar precipitaciones de cal. Una vez por semana se eliminan los depósitos orgánicos ocasionales en el sistema con una solución cáustica caliente al 2%.
La línea filtración con todas sus unidades debería esterilizarse diariamente.

2.4.7 Tanque cabeza y cola

Para minimizar las pérdidas de extracto, debe haber un concepto de reciclado de las primeras y últimas aguas de lavado. Al inicio y termino del ciclo de filtración la fase mixta agua /cerveza se recuperan y almacenan temporalmente en el tanque de cabeza y cola.

Durante la filtración las primeras y últimas agua de lavado pueden ser mezcladas proporcionalmente a la alimentación del filtro, en la figura 17 se muestra vista del tanque de cabeza y cola, su capacidad es de 350 HL.

Figura 17. Tanque de cabeza y cola. Fuente: Planta de elaboración CCU Temuco, 2018

2.4.8 Estación de mezclas de tierras y preparación de aditivos.

A fin de evitar las emisiones de polvo en la sala de filtración la suspensión de las tierras debe ser premezclada en la instalación de almacenado de Kieselguhr utilizando sistema de desempolvamiento.

La estación de tierras está compuesta por recipientes para tierras granosas y finas, en la figura 18 se muestra la estación de carga y mezcla de aditivos, el operario realiza de manera manual la descarga de tierras

Figura 18. Estación de mezcla de tierras y preparación de aditivos. Fuente: Planta de elaboración CCU Temuco, 2018

2.4.9 Planta de carbonatación

Consiste en la incorporación de CO2 a la cerveza en cantidad controlada a medida que es transferida, y se mide el nivel de carbonatación, de acuerdo a los resultados se reajusta la válvula de control de flujo del dióxido de carbono, en la figura 19 se muestra vista del equipo de carbonatación de cerveza, la cual posee un diseño zigzag para un mejor contacto entre las fases de CO_2 y cerveza.

Figura 19. Planta de carbonatación de cerveza. Fuente: Planta de elaboración CCU Temuco, 2018

2.4.10 Planta dilución gruesa y fina

Es el proceso en el cual se mezcla la cerveza hasta límites precisos de alcohol u otros valores característicos.
La dilución gruesa de la cerveza concentrada con el agua desairada se realiza antes del filtro y es volumétrica.
La dilución "fina" de la cerveza con el agua desairada se realiza posterior a la filtración y estabilización, permite el ajuste final del extracto.

2.4.11 Planta de desaireación del agua y tanque de espera

El flujo de agua ingresa a la columna especialmente diseñada por la parte superior, y distribuida sobre los conductos internos para caer en forma de lluvia, El CO2 ingresa a la columna por la parte inferior. En la columna el agua es desairada en contra-flujo por medio del CO2, (además se elimina nitrógeno y argón).
Después de eliminar el oxígeno el agua es carbonatada, enfriada y desinfectada por medio de luz ultravioleta, para luego almacenar en un tanque de 800 HL, capacidad suficiente para garantizar la operación permanente del sistema.

Otros componentes:

- Intercambiador de calor tubo y carcaza.
- Tanque dosificador antioxidante y papaina.
- Tanque dosificador de caramelo.
- Tanque dosificador espumante.
- Bombas centrifugas y peristálticas.
- Válvulas Neumáticas, manual, doble asiento, etc.

Instrumentación:

- Sondas de lleno de vacío.
- Flujometro inductivo.
- Sonda de protección contra marcha en seco.
- Captor de presión para medida de contenido.
- Microprocesador de 2 canales (orbisphere) con sensor de CO2 y O2.
- Sensor de temperatura.
- Fotómetro, aparato para medir turbidez (Sigrist).

2.5 El proceso de Centrifugación

Introducción

La separación de substancias de diferente densidad mediante movimiento giratorio se conoce como centrifugación. La centrifugación es una de las principales operaciones utilizada para la separación de células de caldos biológicos ***(Roush y Lu, 2008; Wiesmann y Bider, 1982)***, especialmente cuando los caldos no son fácilmente filtrables, o la adición de ayudas-filtro no es recomendable por razones de costos o de producción excesiva de desechos contaminantes.

La centrifugación también es empleada en la remoción de desechos celulares de caldos de células que han sido sujetas a rompimiento, en la separación de precipitados proteicos **(*Bell et al., 1983*)** y para la recuperación de productos insolubles como los cuerpos de inclusión. Estos últimos debido a su tamaño (0.3 – 1 μm) y alta densidad (1.3 – 1.5 g/cm3) pueden ser separados de los restos celulares por centrifugación en dos o tres pasos, utilizando agua de lavado y detergentes para facilitar la separación. Cuando se utiliza la centrifugación, la diferencia entre la densidad de los sólidos (células o partículas) y el caldo, se incrementa por la acción de las fuerzas centrífugas que se generan por las altas velocidades de rotación de los equipos que se emplean (***Bjurstrom, 1985)***.
Se presentan los fundamentos de la centrifugación que se derivan de la Ley de Stokes, la cual describe los aspectos básicos del movimiento de un sólido en un líquido cuando existe un gradiente de densidad.

2.5.1 Fundamentos de la centrifugación

El estudio de las separaciones sólido-líquido por centrifugación está basado en la teoría de la sedimentación. Ésta permite desarrollar algunas predicciones del comportamiento de los equipos centrífugos, no sólo para poder especificarlos y dimensionarlos, sino que también ofrece un apoyo adecuado para su correcta operación. La teoría de la sedimentación está basada en la Ley de Stokes que establece los aspectos básicos del movimiento de un sólido en un líquido cuando existe un gradiente de densidad. Este movimiento puede ser causado por la fuerza gravitacional o por una fuerza centrífuga. Con base a lo anterior, esta sección se centra en cuatro aspectos fundamentales:

- La Ley de Stokes.
- La sedimentación por acción de la gravedad.
- La sedimentación por acción de una fuerza centrífuga.
- El factor G.

2.5.1.1 Ley de Stokes

La velocidad de sedimentación de una partícula esférica en un medio continuo para Reynolds menores a 1 (región de resistencia viscosa), está descrita por la Ley de Stokes (Figura 20). Se puede suponer que esta ley es aplicable para las suspensiones diluidas características de los caldos biológicos.

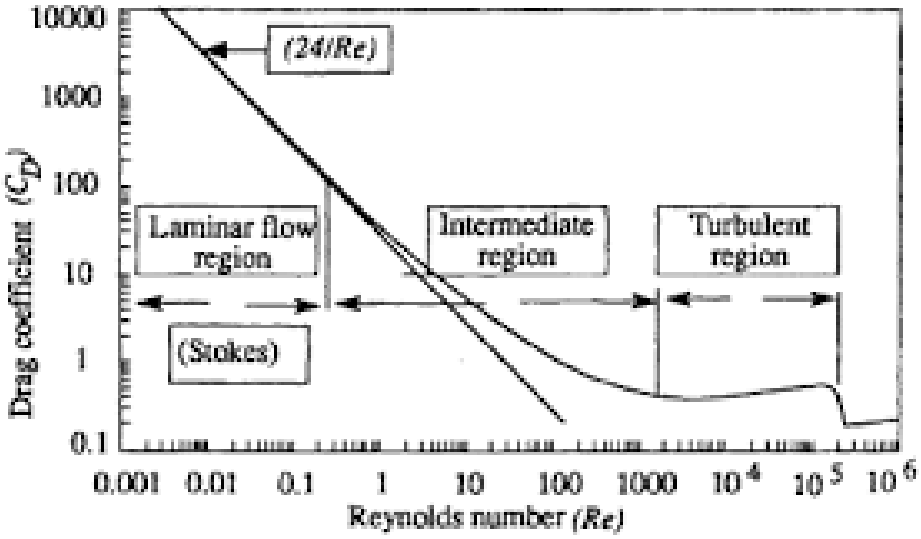


Figura 20. Factor de fricción para diferentes Número de Reynolds**.** Fuente: Bio Separaciones Tejeda 2006.

La Ley de Stokes establece que cuando se aplica una fuerza a una partícula en un medio continuo ésta se acelera (F = ma), hasta que alcanza una velocidad a la cual la resistencia a su movimiento iguala a la fuerza aplicada (mp d /dt = 0). En una sedimentación libre la fuerza que actúa sobre la partícula es la de la gravedad, mientras que en una sedimentación centrífuga la fuerza es la del campo centrífugo. Las fuerzas que se oponen al movimiento de las partículas pueden agruparse en la fuerza de flotación descrita por el principio de Arquímides y la fuerza de arrastre (resistencia de forma y de fricción) descrita por la Ley de Stokes.
De acuerdo a lo anterior, el balance de fuerzas para una partícula en equilibrio en un medio continuo queda expresado de acuerdo a (1):

$$Fuerza\ de\ aceleración\ (F_{ac}) = Fuerza\ de\ flotación\ \left(F_f\right) + Fuerza\ de\ arrrastre\ (F_a) \qquad (\mathbf{1})$$

Para el caso de partículas esféricas el balance anterior puede expresarse a partir del esquema en la figura 21, donde las fuerzas que interactúan son la fuerza de flotación, fuerza de arrastre y fuerza de gravedad, el balance de fuerza con los términos incorporados se muestra en la ecuación (2).

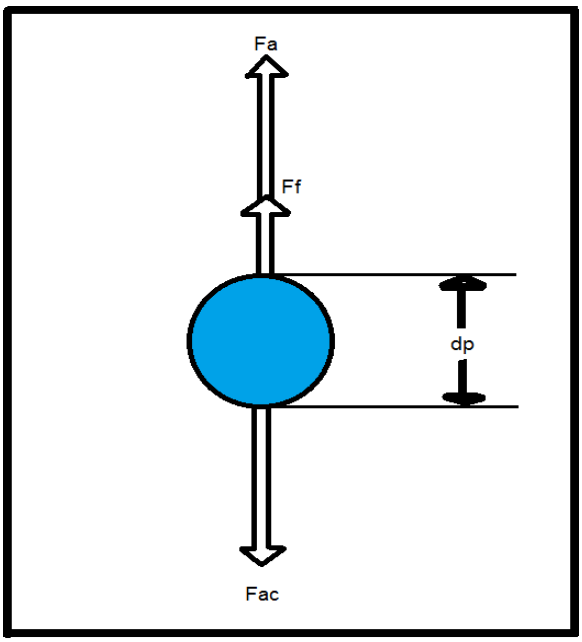


Figura 21. Balance de fuerzas en una partícula esférica en equilibrio en un medio continuo. Fuente: Bio Separaciones Tejeda 2006.

$$\frac{\pi d_p^3 \rho_p a}{6} = \frac{\pi d_p^3 \rho_L a}{6} + 3\pi d_p \mu v_\infty \quad (\mathbf{2})$$

Donde:
dp: Diámetro de la partícula. [L].
ρ_p: Densidad de la partícula. [M/L3].
a: Aceleración. [L/t2].
ρ_L: Densidad del líquido. [M/L3].
μ: Viscosidad del fluido. [M/L – t].
v_∞: Velocidad terminal de la esfera. [L/t].

Es importante hacer notar que si en el proceso de sedimentación la partícula parte del reposo, conforme la velocidad de la partícula se incrementa la fuerza de arrastre se incrementa. Al alcanzar el equilibrio de fuerzas la partícula se mueve a la velocidad constante v_∞ (velocidad terminal).
La ecuación (2) puede ser modificada para presentarse como una expresión de la Ley de Stokes, de la siguiente manera:

$$3\pi d_p \mu v_\infty = \frac{\pi d_p^3 a}{6}(\rho_p - \rho_L) \quad (\mathbf{3})$$

La velocidad de sedimentación de una partícula de acuerdo a la ecuación (3), es la siguiente

$$v_{\infty} = \frac{d_p^2 \Delta\rho a}{18\mu} \quad (\mathbf{4})$$

Donde $\Delta\rho = \rho_p - \rho_L$

De la ecuación (4), la Ley de Stokes implica que un proceso de sedimentación puede ser mejorado incrementando el tamaño de partícula o la diferencia de densidades, reduciendo la viscosidad del medio o incrementando la aceleración de las partículas. Esta Ley ha sido desarrollada para partículas esféricas, que se mueven uniformemente en fluidos newtonianos y que no se obstruyen entre sí. Se puede expresar la velocidad de sedimentación de una partícula, en dos casos límites de interés: a) sedimentación por acción de la gravedad y b) sedimentación por acción de una fuerza centrífuga.

2.5.1.2 Sedimentación por acción de la gravedad

En varios procesos de separación sólido-líquido la fuerza impulsora de la sedimentación es sólo la de la gravedad. La velocidad de sedimentación por gravedad de una sustancia, proporciona información básica necesaria para el diseño de cualquiera de los procesos de sedimentación. De acuerdo con la Ley de Stokes si la aceleración de la sedimentación es sólo la de la gravedad, la expresión de la velocidad de sedimentación es:

$$v_g = \frac{d_p^2 \Delta\rho g}{18\mu} \quad (\mathbf{5})$$

Donde:
a = g: Aceleración de la gravedad. [L/t2].
g: Velocidad terminal en un campo gravitacional. [L/t].

2.5.1.3 Sedimentación centrifuga

En las separaciones sólido-líquido mediante centrífugas la velocidad de sedimentación es mayor que la sedimentación libre o gravitacional, debido a que los equipos al girar producen una mayor aceleración de las partículas ***(Brunner y Hemfort, 1988).*** Bajo estas condiciones la velocidad de sedimentación derivada de la ecuación (5) es:

$$v_\omega = \frac{d_p^2 \Delta\rho \omega^2 r}{18\mu} \quad (\mathbf{6})$$

Donde:

a = ω^2r: Aceleración centrífuga. [L/t2].
9: Velocidad de rotación en radianes. [t−1].
r: Distancia radial del eje de rotación a la partícula. [L].

Varias aplicaciones importantes pueden obtenerse de los principios inherentes a las ecuaciones, a continuación, se presentan algunas de ellas:

a) El diámetro aparente de las bacterias es del orden de diez veces menor que el de las levaduras, por lo que su velocidad de sedimentación es cien veces menor, ya que ésta es proporcional al cuadrado del diámetro de la partícula.
b) Las células contienen más del 70% de agua por lo que su densidad es muy semejante a la de los caldos, por lo tanto, el parámetro $\Delta\rho$ puede ser muy bajo.
c) Algunos caldos biológicos son muy viscosos, propiedad que dificulta la sedimentación.
d) La velocidad de sedimentación puede ser incrementada en un equipo centrífugo aumentando la velocidad de rotación o la distancia de sedimentación (diámetro de la centrífuga). Para obtener una expresión para describir la sedimentación en flujo no laminar la ecuación puede ser expresada como se muestra en (7):

$$\frac{\pi d_p^3 a \Delta\rho}{6} = \left(\frac{\pi d_p^2}{4}\right)\left(\frac{1}{2}\rho_L v_\infty^2\right)\left(\frac{24}{\frac{d_p v_\infty \rho_L}{\mu}}\right) \quad (\mathbf{7})$$

$$\frac{\pi d_p^3 a \Delta\rho}{6} = AKf$$

$$f = \frac{\pi d_p^3 a \Delta\rho}{6AK}$$

donde:

A: Área característica. [L2].
K: Energía por unidad de volumen. [M/Lt2].
f: Factor de fricción. [adimensional.]

Particularmente, para flujo reptante alrededor de una esfera ***(Bird et al., 2002)***

$$f = \frac{24}{Re} \qquad Re < 0{,}1$$

Para valores mayores del número de Reynolds se tiene:

$$f = \left(\sqrt{\frac{24}{Re}} + 0{,}5407\right)^2 \qquad Re < 6000$$

$$f = 0{,}44 \qquad 5 * 10^2 < Re < 10^5$$

2.5.1.4 Factor G

En la caracterización y escalamiento de centrífugas frecuentemente se emplea el factor G, que es una medida relativa de la velocidad de sedimentación de una partícula en un campo centrífugo con respecto a su velocidad de sedimentación en el campo gravitacional. De acuerdo a lo anterior se obtiene:

$$G = \frac{v_\omega}{v_g} = \frac{\omega^2 r}{g}$$

G puede ser referida a un radio característico el cual generalmente es el radio exterior del campo centrífugo. Esto permite desarrollar expresiones prácticas para estimar la G como la siguiente:

$$G = 5{,}6 * 10^{-7} N^2 D \qquad (\mathbf{8})$$

Donde N está en rpm, el diámetro del tazón de la centrífuga (o punto de interés) D en mm y G es adimensional como se muestra en la ecuación (8).

2.5.2 Equipos de sedimentación centrifuga

En los equipos de sedimentación centrífuga también llamados de tazón sólido o canasta no perforada (para distinguirlos de los de canasta perforada), la suspensión se alimenta

a un tazón que se hace girar provocando que los sólidos se colecten sobre una pared y el sobrenadante se recupere por rebosamiento o por acción de un colector de líquido.

En relación a la forma de descargar los sólidos, las centrífugas sedimentadoras pueden operar en forma intermitente, semi intermitente o continua. Las centrífugas sedimentadoras se utilizan en operaciones de separación sólido-líquido, tanto para remoción de biomasa (clarificación) como para recuperar sólidos durante la cosecha celular.
En las operaciones de clarificación el caldo a procesar generalmente contiene una baja cantidad de sólidos, del orden del 1%. El objetivo es producir un líquido claro de tal manera que, en las operaciones de separación posteriores, la interferencia por sólidos sea mínima. En las operaciones de recuperación de sólidos las corrientes de salida pueden contener hasta un 40% de sólidos en volumen.
A continuación, se efectúa una breve descripción de los principales tipos de centrífugas sedimentadoras utilizadas en las bioseparaciones.

2.5.2.1 Centrifuga tubular

Las Centrífugas Tubulares (CT) consisten básicamente de un tubo vertical esbelto que gira a altas velocidades por la acción de un motor eléctrico, o una turbina de aire o vapor

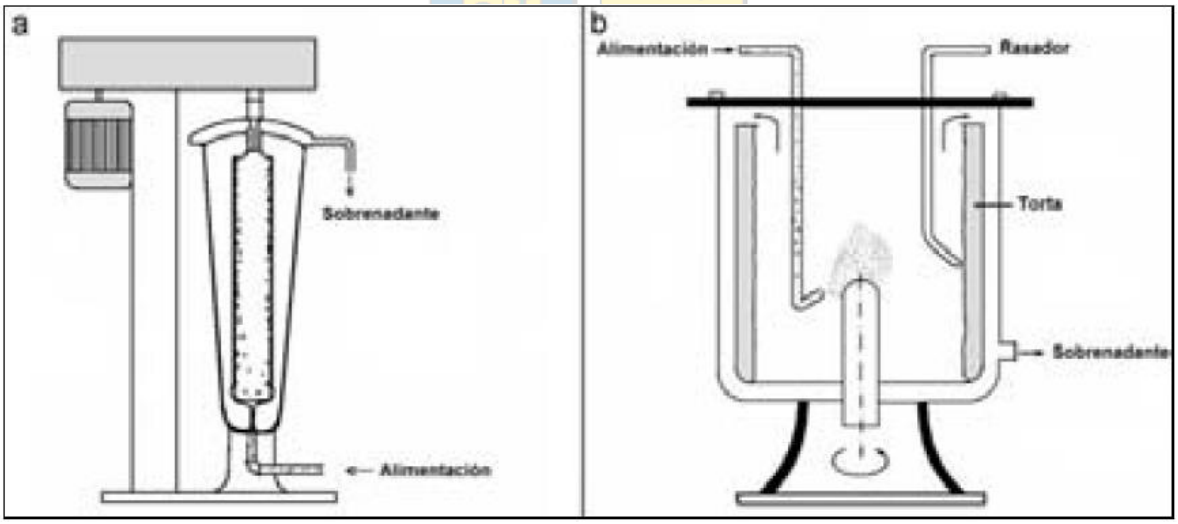


Figura 22. Centrifugas sedimentadoras. a) Tubular y b) De tazón sólido. Fuente: Bio Separaciones Tejeda 2006.

Este tipo de centrífuga es uno de los más eficientes y sencillos, capaz de separar partículas hasta de 0.1 µm. Las CT pueden contar con un sistema de enfriamiento por lo que son empleadas en el manejo de caldos con enzimas o proteínas.

Como se observa en la Figura 22, durante una operación típica de la CT la suspensión es alimentada por la parte inferior y los sólidos sedimentan en la pared del tubo. El líquido claro se colecta por rebosamiento en la parte superior. Conforme se forma la torta, el área de flujo se reduce y el tiempo de residencia del líquido disminuye. Esto se traduce en un aumento gradual del contenido de sólidos en el sobrenadante que puede ser determinado por mediciones de turbidez. La torta tiene que ser descargada manualmente, por lo que su operación es por lotes.
Un modelo típico de laboratorio consta de un tubo de 4.5 cm de diámetro por 25 cm de longitud, el cual puede girar a una velocidad de hasta 50, 000 rpm, desarrollando campos hasta de 62, 000 G, con una capacidad de hasta 100 L/h. Los modelos industriales típicos cuentan con un tubo de 11.5 cm de diámetro por 76 cm de longitud, el cual puede girar hasta con 15, 000 rpm desarrollando campos de hasta de 12, 000 G, con capacidad entre 500 y 3, 500 L/h. La capacidad de sólidos es de 2 a 4 kg por lote.
Este tipo de centrífugas presentan algunos modelos completamente sellados para minimizar problemas de formación de espuma y aerosoles, lo cual puede ocasionar fugas del sistema y debe ser evitado cuando se trabaja con sustancias tóxicas o células recombinantes.

2.5.2.2 Centrifugas de tazón solido

Las centrífugas de tazón sólido (Fig. 23) o centrífugas por lotes son muy similares a las centrífugas tubulares, pero menos esbeltas; su relación de longitud a diámetro es de alrededor de 0.6, mientras que el de las tubulares es de 4 – 8.

Las centrífugas de tazón sólido normalmente son operadas con su eje en posición vertical. La alimentación de la suspensión se efectúa en el fondo del tazón, el cual al girar permite que los sólidos se depositen sobre la superficie de la pared del tazón y el sobrenadante se obtenga en forma continua por rebosamiento en la parte superior. En algunos modelos el ciclo se controla por medio de un detector del espesor de la torta. El líquido residual sobre la torta puede ser removido utilizando un tubo rasador móvil.

La forma de descarga de los sólidos depende de su naturaleza. Los sólidos muy fluidos pueden descargarse sin parar la centrífuga y los sólidos muy compactos pueden descargarse utilizando una cuchilla interior de la centrífuga que permite raspar la pared del tazón para desprender la torta. Ambos tipos de descarga se realizan a través de la parte inferior de la centrífuga. Un tipo especial de centrífuga por lotes es la de tazón triple.

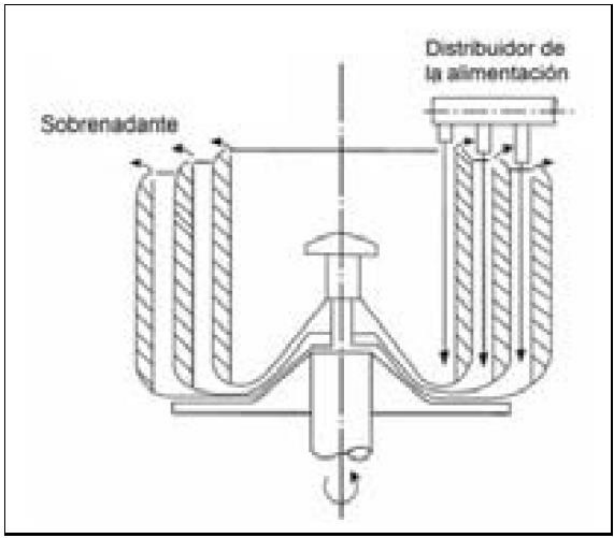


Figura 23. Centrifugas de tazon triple. Fuente Svarausky, 1979

Las centrífugas por lotes en su versión de laboratorio presentan tazones de 15 cm de diámetro y las de planta piloto entre 23 – 53 cm, con capacidades volumétricas de 2.7 a 27.0 L. Las industriales tienen tazones entre 95 – 125 cm con capacidades volumétricas de 100 a 300 L.

2.5.2.3 Centrifugas de cámara múltiple

Las centrífugas de cámara múltiple (Fig. 24) fueron creadas para incrementar la capacidad de manejo de sólidos de las centrífugas tubulares. Estas centrífugas consisten de una serie de tazones concéntricos con deflectores que provocan un flujo en serie de la suspensión. Su operación permite la clasificación de las partículas conforme pasan de una cámara a otra. El líquido claro se obtiene por rebosamiento en la última cámara. Este arreglo permite un mayor tiempo de residencia del líquido y una mayor capacidad de manejo de sólidos, que la centrífuga tubular.

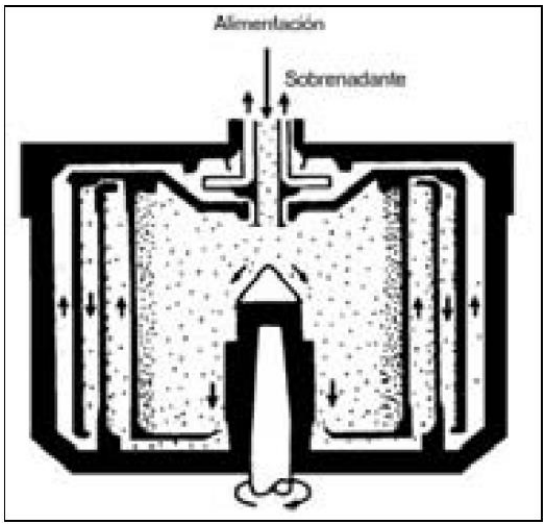


Figura 24. Centrifuga de cámara múltiple*. Fuente: Axelsson, 1985.*

El diámetro de los equipos de cámara múltiple varía de 335 a 615 mm, con velocidades de rotación entre 5, 000 y 8, 400 rpm, produciendo campos entre 5, 000 y 9, 000 G, respectivamente. Los tipos más comunes constan de 2 a 6 cámaras. La capacidad de manejo de sólidos varía entre 2.5 y 60.0 L dependiendo del material y el número de cámaras. La descarga de sólidos y mantenimiento de estos equipos es más difícil que el de las centrífugas tubulares, ya que la centrífuga tiene que ser desmantelada para sacar los sólidos. Este tipo de equipo no permite el lavado de la torta.

2.5.2.4 Centrifugas decantadoras o de tornillo

Las centrífugas decantadoras (Fig. 25) se caracterizan por un tazón horizontal con una sección cilíndrica y una sección cónica, con una relación de longitud a diámetro entre 1.5−3.5. El tazón contiene un tornillo transportador que gira en la misma dirección, pero a una velocidad ligeramente superior o inferior que el tazón (entre 5 - 100 rpm de diferencia). Las velocidades de rotación son de 1, 600 a 6, 000 rpm por lo que los campos centrífugos son bajos.
En las centrífugas decantadoras la suspensión es introducida a través de perforaciones por un tubo axial concéntrico a la flecha del tornillo, al final de la sección cónica o de compresión de sólidos. Los sólidos que se depositan en la pared son transportados y descargados continuamente por el extremo cónico de la centrífuga, donde escurren antes de salir. El líquido claro se obtiene por rebosamiento en el extremo opuesto a través de orificios de descarga que fijan el nivel del líquido en la centrífuga.

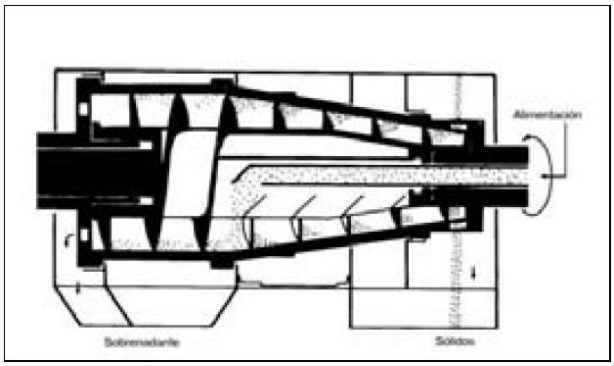


Figura 25. Centrifuga decantadora. *Fuente: Axelsson, 1985.*

Existen diversos diseños de centrífugas decantadoras. Los diámetros de los tazones varían de 15 a 140 cm para los modelos piloto e industriales. La descarga de sólidos varía de 30 kg/h hasta 60 ton/h, con alimentaciones entre 3.8 y 1890.0 L/min, respectivamente. La longitud de la sección cilíndrica y la sección cónica pueden variar de acuerdo a las aplicaciones. Entre más larga sea la sección cilíndrica mayor es la clarificación alcanzada. Por otro lado, el aumento de longitud en la sección cónica permite la obtención de tortas con menor contenido de agua.

Entre mayor sea el nivel de líquido dentro de la centrífuga se obtendrá una mejor clarificación, pero un menor escurrimiento de la torta en la sección cónica.
La disminución de la velocidad de rotación del tornillo transportador aumenta la capacidad de desagüe de la torta, pero disminuye la capacidad de manejo de sólidos.

La centrífuga de tornillo es una de las más utilizadas en bioseparaciones principalmente para manejo de grandes cantidades de sólidos como es el caso del tratamiento de aguas residuales ***(Amirante y Catalano, 2000).***

2.5.2.5 Centrifuga de discos

La centrífuga de discos consta de un eje vertical sobre el cual se monta un conjunto de discos en forma de conos truncados, uno sobre otro. El rotor de la centrífuga provoca el giro tanto de los discos como del tazón de la centrífuga (Fig. 26).
Las centrífugas de discos son las más utilizadas en BSL. Los discos constan de bordos internos que permiten mantener pequeñas separaciones entre ellos, del orden de 0.5 a 2.0 mm. El ángulo que forman los conos con la vertical varía entre 35 y 50° dependiendo de la aplicación particular. Entre la pila de discos y el tazón existe un espacio que permite la acumulación de los sólidos.

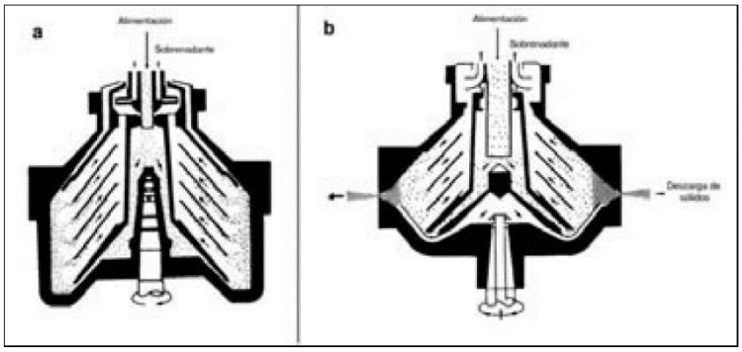


Figura 26. Centrífugas de discos. a) Retención de sólidos. b) Tazón abierto.
Fuente: Jacobs y Penney, 1987.

Durante la operación de la centrífuga de discos, la suspensión es alimentada continuamente en el fondo del tazón a través de la parte central de la flecha, y fluye hacia arriba entre las placas hacia la salida en la parte central superior del equipo. Debido a la fuerza centrífuga los sólidos se depositan en la cara interna de los discos, resbalando hacia la cámara colectora debido al ángulo de los discos.

En relación a la forma de descarga de sólidos los principales tipos de centrífugas de discos son de:

a) operación por lotes con respecto a la descarga de sólidos, también llamadas de retención de sólidos
b) tazón abierto de descarga intermitente de sólidos
c) válvula tipo boquilla de descarga intermitente de sólidos
d) boquilla para la descarga continua de sólidos.

En las centrífugas de retención de sólidos éstos se acumulan hasta que la cámara se llena. La centrífuga tiene que ser detenida y descargada manualmente o con auxilio de un forro que se coloca previamente sobre la pared del tazón. Debido a la forma de su descarga de sólidos, este tipo de centrífuga es recomendable sólo para suspensiones diluidas conteniendo alrededor de 1% en volumen de sólidos.

El diámetro de los tazones de las centrífugas de retención de sólidos varía de 24 a 44 cm y las fuerzas centrífugas de 5, 000 a 8, 000 G. La capacidad de sólidos varía de 5 – 20 L y los flujos de 0.4 a 1, 500 L/min.
Las centrífugas de disco de tazón abierto constan de dos piezas cónicas unidas horizontalmente por sus caras más grandes. La descarga de sólidos se realiza por medio de un sistema hidráulico que permite abrir y cerrar los orificios de descarga entre las piezas. La duración y frecuencia de la apertura de la descarga depende de la cantidad y fluidez de los sólidos. Los valores típicos son de 0.13 a 0.30 s de apertura por minuto de operación. Esta frecuencia es controlada con relojes acoplados a medidores de lodo o medidores de turbidez en el líquido de salida. Este tipo de centrífugas permite manejar

caldos con contenido de sólidos hasta del 10%. Las fuerzas centrífugas varían de 5, 000 a 7, 000 G y los gastos de 3.8 a 1, 500 L/min.

En las centrífugas con válvulas tipo boquilla la descarga de sólidos se controla con este tipo de válvulas situadas en la periferia del tazón. Sus ciclos varían de 0.07 a 0.10 s de apertura por minuto de operación. Tal precisión no puede ser lograda por las centrífugas de tazón abierto. La ventaja de este tipo de centrífugas, debido a que generan campos de hasta 15, 000 G, es que son especialmente útiles para caldos biológicos donde el diferencial de densidad suele ser bajo y la viscosidad alta. Las suspensiones que pueden ser manejadas, alcanzan hasta un 10% en volumen de sólidos.

En las centrífugas de boquillas con descarga continua éstas se sitúan en la periferia del tazón. El número y el tamaño de las boquillas se ajustan de tal manera que exista un flujo continuo de sólidos, sin que éstos se acumulen. El espaciamiento de las boquillas debe prevenir zonas muertas de depósitos de sólidos. La principal ventaja de este tipo de unidades es que pueden manejar suspensiones más concentradas.

Las centrífugas de discos en general poseen una gran capacidad de sedimentación debido principalmente a su gran área, a sus cortas distancias de sedimentación y a los altos campos centrífugos que generan. Por otro lado, requieren de medidas de higiene y seguridad especiales como: a) manejo mecánico seguro, b) protección contra ruido y daños corporales y c) protección contra incendios, explosiones o diseminación de sustancias tóxicas o contaminantes.

2.5.3 Diseño de equipo de centrifugación

El diseño de los equipos de centrifugación está basado en la teoría de sedimentación, lo cual puede visualizarse más fácilmente en el caso de las centrífugas tubulares debido a la sencillez de su geometría. Este análisis puede ser extendido al caso de las centrífugas de discos como veremos a continuación.

La geometría del sistema (Fig 27) se basa en que x es la distancia a lo largo del canal que forman los discos y es la distancia normal a partir del disco inferior. La distancia del eje a la parte externa de los discos es R0 y a la parte interna R1. Los discos se sitúan con un ángulo θ.

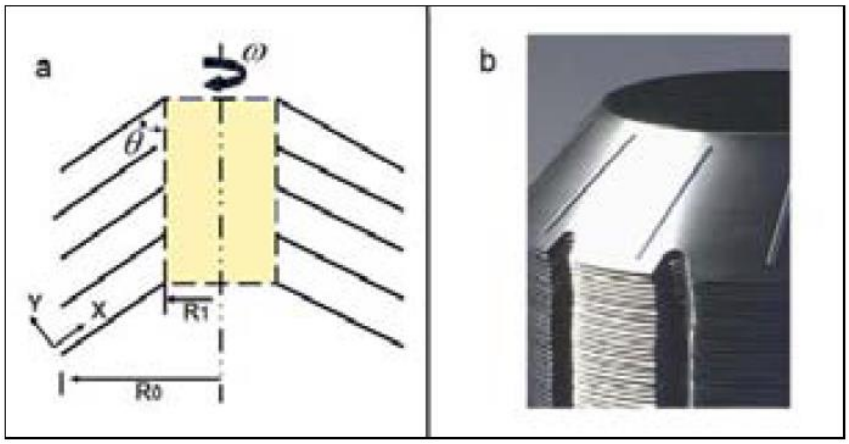


Figura 27. Centrífuga de discos. a) Esquema de diseño y b) Pila de discos. Fuente: Bio Separaciones Tejeda 2006.

El flujo se alimenta de tal manera que fluye hacia arriba a través de los espacios de los discos. En el sentido angular se supone que el líquido gira a la misma velocidad que los discos.

En el análisis se supone que el flujo global Q se divide equitativamente entre los espacios formados por todos los discos, de tal manera que el flujo en cada espacio es Qn = Q/n, donde n es el número de espacios formados entre los discos.

Primero se desarrolla una expresión para el tiempo de residencia en la centrífuga, posteriormente una expresión para el tiempo de sedimentación, y finalmente se combinan ambas expresiones para relacionar el gasto volumétrico manejable con las propiedades del caldo y la geometría de la centrífuga.

2.5.3.1 Tiempo de residencia en una centrífuga de discos

En una centrífuga de discos la partícula que se desea sedimentar se mueve por convección y por sedimentación. El movimiento convectivo es paralelo a los discos y el movimiento por sedimentación es en sentido horizontal.

Si los ejes de referencia se fijan como aparece en la Figura 30, el movimiento producido por sedimentación tiene componentes tanto en x como en y, de tal manera que la velocidad neta de la partícula en la dirección x, es la resultante de la velocidad convectiva del fluido (aquí se supone que la partícula se mueve a la misma velocidad que el fluido) y la componente en x de la velocidad de sedimentación que se opone a este movimiento.

Una condición necesaria para alcanzar una separación efectiva, es que la velocidad convectiva de la partícula sea mucho mayor que el componente de la velocidad de sedimentación que actúa en sentido opuesto. En el siguiente desarrollo se parte de este supuesto cuando se analiza la velocidad de la partícula en el sentido x.

Expresión para v_x

Para obtener una expresión del tiempo de residencia de una partícula en una centrífuga de discos es necesario primero desarrollar una expresión para la velocidad de la partícula en el sentido x.En el desarrollo de la expresión para x se supone un arreglo geométrico sencillo como se muestra en la Figura 28.

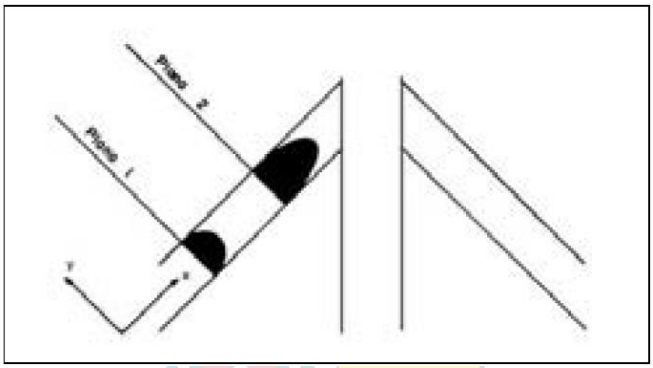


Figura 28. Perfil de velocidades en una centrífuga de discos. Fuente: Bio Separaciones Tejeda 2006.

La velocidad x varía con la distancia x dado que el gasto es constante en toda la sección de cada película y debido que la sección transversal de flujo disminuye conforme x aumenta (se supone que el líquido es incompresible). La velocidad vx también varía en el sentido y formando un perfil de velocidades con x = 0 en las superficies de los discos.

Si se considera una sección de película de longitud L, donde la velocidad x sólo depende de y pero no de x (o r); cuando se desprecian los efectos inerciales, se considera que el sistema se encuentra en el estado estacionario y el flujo es laminar, la ecuación de movimiento para este sistema puede ser escrita de la siguiente forma ***(Bird et al., 2009):***

$$\frac{\Delta P}{L} = -\mu \frac{d^2 v_x}{dy^2} \qquad (\mathbf{9})$$

La ecuación (9) puede ser integrada dos veces entre los límites:

$$Para\ y = \frac{a}{2}, \qquad v_x = 0$$
$$Para\ y = -\frac{a}{2}, \qquad v_x = 0$$

y obtener la expresión:

$$v_x = \frac{\Delta P a^2}{8\mu L}\left[1 - \left(\frac{2y}{a}\right)^2\right] \quad (\mathbf{10})$$

Donde a es el espesor de la película y P la presión.

La ecuación (10) se puede expresar en términos de Qn si se integra a lo largo del área de flujo con los límites apropiados. Considerando que el área de flujo puede ser aproximada por un rectángulo de ancho a y largo 2πr entonces:

$$Q_n = \int_0^{2\pi r}\int_{-\frac{a}{2}}^{\frac{a}{2}} \frac{\Delta P a^2}{8\mu L}\left[1 - \left(\frac{2y}{a}\right)^2\right] dydz \quad (\mathbf{11})$$

Donde Qn es el flujo volumétrico entre dos discos de la centrífuga.
La integración de la ecuación (11) conduce a:

$$Q_n = \frac{\pi \Delta P^3 r}{6\mu L} \quad (\mathbf{12})$$

Combinando las ecuaciones (11) y (12) anteriores se tiene que:

$$v_x = \left(\frac{3Q_n}{4\pi r a}\right)\left[1 - \left(\frac{2y}{a}\right)^2\right] \quad (\mathbf{13})$$

o bien en términos del flujo volumétrico total:

$$v_x = \left(\frac{3Q}{4n\pi r a}\right)\left[1 - \left(\frac{2y}{a}\right)^2\right] \quad (\mathbf{14})$$

La ecuación (14) describe el perfil de la velocidad de la película, así como su comportamiento en diferentes planos (a diferentes r) en función de la velocidad promedio.
De la ecuación (14) se puede obtener una expresión para un diferencial de tiempo de residencia de la siguiente forma:

$$dt_r = \frac{dx}{\left(\frac{3Q_n}{4\pi r a}\right)\left[1 - \left(\frac{2y}{a}\right)^2\right]} \quad (\mathbf{15})$$

2.5.3.2 Cálculo del tiempo de sedimentación y el gasto volumétrico

Para desarrollar la expresión del tiempo de sedimentación de una partícula, que a su vez permita desarrollar una expresión para el gasto manejable en una centrífuga de discos, (al igual que se hizo para las centrífugas tubulares) se consideran dos casos de interés:

- Tiempo para el 100% de sedimentación
- Tiempo para el 50% de sedimentación.

Tiempo para el 100% de sedimentación y gasto volumétrico

En este caso la partícula más difícil de capturar se localiza en la parte inferior derecha de la película en (x = 0 , y = −a/2), y la parte más lejana en la que puede sedimentar es en la parte superior izquierda de la película en [x = (Ro−R1)/sen = , y = a/2].
La velocidad de sedimentación en el sentido radial está dada por la Ley de Stokes:

$$\frac{dr}{dt_s} = v_g \frac{\omega^2 r}{g} \qquad \textbf{(16)}$$

Por lo tanto:

$$dt_s = \frac{gdr}{v_g \omega^2 r} \qquad \textbf{(17)}$$

La condición de diseño que establece que el tiempo de sedimentación debe ser menor o igual que el tiempo de residencia puede lograrse igualando las ecuaciones (15) y (17) para obtener la expresión:

$$\frac{gdr}{v_g \omega^2 r} = \frac{dx}{\left(\frac{3Q_n}{4\pi r a}\right)\left[1 - \left(\frac{2y}{a}\right)^2\right]} \qquad \textbf{(18)}$$

de acuerdo a la geometría del sistema se puede efectuar el siguiente cambio de variables en la ecuación (18).

$$dy = \cos\theta \;\; dr$$

$$r = R_0 - x sen\, \theta$$

Con estas nuevas variables la ecuación (18) se transforma en:

$$\frac{3}{2a}\left[1-\left(\frac{2y}{a}\right)^2\right]dy=\left[\frac{2\pi n v_g \omega^2}{Qg}\right](R_0-x sen\,\theta)^2\,(\cos\theta dx) \qquad (\mathbf{19})$$

La ecuación (19) puede ser integrada utilizando el cambio de variable u = (Ro – xsen =) y los límites siguientes:

$$Para\ x=0, \qquad y=-\frac{a}{2}$$

$$Para\ x=\frac{R_0-R_1}{sen\,\theta}, \qquad y=\frac{a}{2}$$

Obteniéndose:

$$Q=v_g[\frac{2\pi n\omega^2}{3g}(R_0^3-R_1^3)\cot\theta] \qquad (\mathbf{20})$$

La ecuación (20) también puede ser expresada en función del parámetro Σ de la siguiente manera:

$$Q=v_g\Sigma \qquad (\mathbf{21})$$

Donde Σ para este caso está definida por la expresión dentro del paréntesis cuadrado de la ecuación (20).

Tiempo para el 50% de sedimentación y gasto volumétrico

Para calcular el gasto que puede manejar la centrífuga para un corte del 50% (ecuación (22)), debido a la separación tan pequeña de los discos una buena aproximación está dada a partir de la ecuación (21):

$$Q_{50}=2v_g\Sigma \qquad (\mathbf{22})$$

Escalamiento

En el análisis de la operación de la sedimentación centrífuga se han desarrollado expresiones para el cálculo del gasto manejable por una centrífuga de una geometría particular. Este enfoque es debido a que los equipos disponibles se construyen en tamaños específicos, de tal manera que gran parte del problema de separación centrífuga se reduce a una selección del equipo más que a un diseño específico para un

trabajo particular. Por otro lado, las velocidades de sedimentación que se predicen con la Ley de Stokes pueden ser adecuadas para el caso de las centrífugas tubulares, pero pueden resultar hasta dos veces mayores de las realmente obtenidas en las centrífugas de discos. En la selección de equipo de centrifugación una combinación adecuada de los principios teóricos con pruebas experimentales directamente con el material, es lo más recomendable.

Existen dos enfoques para el escalamiento de datos, uno basado en el tiempo equivalente de centrifugación y otro en el área de centrifugación.

Tiempo equivalente

Este enfoque consiste en determinar el tiempo equivalente dado por el producto Gt, donde G está dado por la ecuación anterior y t es el tiempo necesario para producir una centrifugación aceptable, de tal manera que la igualdad:

$$G_1 t_1 = G_2 t_2$$

Puede ser utilizada como un criterio de escalamiento. Los subíndices 1 y 2 se refieren a las escalas estudiadas.

Las pruebas de sedimentación de las muestras se pueden realizar en el laboratorio en una centrífuga de tubos o en una centrífuga de tazón. Las muestras se hacen girar a velocidades específicas a diferentes tiempos hasta producir un sobrenadante claro. El valor de Gt obtenido se usa para la selección de equipos a escala industrial.

La consistencia de los sólidos puede ser estudiada preliminarmente utilizando una varilla de laboratorio sobre la torta después de decantar el sobrenadante.

.

2.5.3.3 Factor sigma

La expresión para calcular el factor Sigma de cada tipo de centrífuga es característica de cada geometría particular ***(Axelsson, 1985).*** Esta área característica o factor Sigma ha sido empleada para escalar equipos con similitud geométrica. En la Tabla 1 se presentan los rangos de los factores Sigma para diferentes tipos de centrífugas.

Tabla 1. Valores típicos de factor Sigma para diferentes tipos de centrifugas. Tejeda 2000

Centrífuga	Σ (m^2)
Intermitente	20 - 200
Decantadora	150 - 2,500
Tubular	2,000 - 3,000
Discos	400 - 120,000

El escalamiento utilizando el factor sigma supone que, para una misma suspensión, la velocidad de sedimentación de las partículas es independiente de la escala. Este supuesto es más utilizado cuando se escalan centrífugas del mismo tipo, de tal manera que:

$$(v_g)_1 = (v_g)_2$$

y utilizando la ecuación (21) de diseño se obtiene:

$$\frac{Q_{50}^1}{\Sigma_1} = \frac{Q_{50}^2}{\Sigma_2}$$

Se debe recordar en este punto que la selección del equipo de centrifugación debe combinar la teoría, la experimentación directa con el material (incluyendo pruebas a nivel piloto) y la experiencia ***(Moir, 1988).***

Capítulo III

MATERIALES Y MÉTODOS

Capítulo III: Materiales y Métodos

3.1 Estimación de factores Sigma del proceso

Se realizó la estimación del parámetro característica Sigma (Σ) para cada caldo madre; esta información se obtuvo del desarrollo de la teoría de centrifugación ya descrita en el capítulo anterior (ver capitulo II Antecedentes).

De la teoría de centrifugación, se tiene que para una centrifuga de discos, la ecuación de diseño es la siguiente:

$$\mathbf{Q = \left[\frac{d_p^2 \Delta\rho g}{18\mu}\right]\left[\frac{2\pi n \omega^2}{3g}\left(R_0^3 - R_1^3\right)\cot\theta\right]}$$

$$\mathbf{v_g = \left[\frac{d_p^2 \Delta\rho g}{18\mu}\right]}$$

$$\mathbf{\Sigma = \left[\frac{2\pi n \omega^2}{3g}\left(R_0^3 - R_1^3\right)\cot\theta\right]}$$

$$\mathbf{Q = v_g\,\Sigma}$$

El flujo de proceso para el caso estudio corresponde a 600 HL/h, que está dado por el flujo nominal de diseño de los equipos de la planta de filtración (filtro Kieselguhr, intercambiadores de calor, bombas, entre otras).

La tarea consiste en encontrar el valor Sigma de cada caldo madre, para esto, se calcularon los valores de los parámetros físico químicos (diámetro de partícula (d_p), densidad del caldo madre (ρ_L), densidad del sedimento (ρ_s), y viscosidad del caldo madre (μ).

3.1.1 Densidad del caldo madre (ρ_L)

La densidad de cada caldo madre fue obtenida a partir de la relación del grado Plato (ºP) de la cerveza una vez terminada la fermentación ya que es ésta la variable que se controla en el proceso.

Densidad es la cantidad de azúcar disuelta en un volumen de líquido. Se puede medir en grados plato (ºP), Brix, o en densidad específica. La densidad específica es relativa al peso de un litro de líquido con el azúcar disuelto. La densidad específica del agua pura es 1,000. Cuando se dice que un mosto tiene una densidad específica de 1,045 significa que un litro de la disolución pesa 1.045 gramos.

Para convertir entre densidad específica y ºP utilizamos las fórmulas:

$$\mathbf{^{o}P = 259 - \left(\frac{259}{\rho_L}\right)}$$

Análogamente

$$\mathbf{\rho_L = \frac{259}{259 - {}^{o}P}}$$

Para simplificar podemos decir que ºP es igual a la parte decimal de la densidad específica partido por cuatro.

3.1.2 Diámetro de partícula (d_p)

El diámetro de partícula para la cepa de levadura *Saccharomyces Carlsbergensis*, fue obtenido a partir de literatura, donde se señala el diámetro teórico promedio de la cepa de levadura. (***cervezadeargentina.com.ar/artículos/levadura)***

Con esto, el diámetro considerado para los cálculos fue de 8 micras.

3.1.3 Densidad del sedimento (ρ_S)

La densidad de los sedimentos fue calculada a partir de la consistencia de la levadura; al suponer que todo el sedimento presente en la cerveza corresponde a levaduras no floculadas, se realiza por esta vía el cálculo de la densidad de ésta; la consistencia hace referencia a que porcentaje en peso de la célula de levadura es agua y que porcentaje de peso de la célula, es efectivamente microorganismo levadura, esta magnitud se pide en unidades porcentuales.

La densidad del sedimento se calculó relacionando la consistencia de la levadura, la densidad del agua líquida a 1 atm y la densidad de la levadura *Saccharomyces Carlsbergensis* en condiciones de peso seco

$$\boldsymbol{\rho_S = C \cdot \rho_{LEVADURA} + \rho_{AGUA} \cdot (1 - C)}$$

Donde

P_S: densidad del sedimento [g/mL]

C: Consistencia de levadura [-]

P_{AGUA}: densidad del agua a 1 atm. [g/mL]

$P_{LEVADURA}$: densidad de la levadura Saccharomyces Carlsbergensis a peso seco [g/mL]

3.1.4 Viscosidad del caldo madre (μ)

La viscosidad del caldo se obtuvo a partir de un viscosímetro Visco-Ball de caída de bola de sistema Hopler, como muestra la Figura 29, el sistema se basa en medir el tiempo en el que una esfera sólida necesita para recorrer una distancia entre dos puntos de referencia dentro de un tubo con muestra, a partir de la ley de Stokes.

$$\boldsymbol{v_g = \left[\frac{d_p^2 \Delta\rho g}{18\mu}\right]}$$

Conocida la distancia que se desplaza la bola y el tiempo que demora en caer, se determina la velocidad terminal vg; conocida además el diámetro de la esfera y la densidad del fluido (cerveza), se procede a calcular la viscosidad.

Se realizaron las mediciones para caldo madre, en dos secciones del proceso; antes del paso por la enfriadera y después del paso por la enfriadera; esto debido a que la temperatura incide directamente en la magnitud de la viscosidad en los líquidos. ***(Hatschek, Emil 1928)***

Los experimentos consistieron en tomar muestras de distintos tanques previos a ser filtrados, luego se realizó muestreo de estos mismos luego del paso por la enfriadera para analizar diferencias.

Figura 29. Equipo Viscosímetro de bola Stokes. Fuente: laboratorio físico químico CCU Temuco 2018

Luego de realizar los análisis de las variables físico químicas que influyen en el proceso de centrifugación, se procede a calcular los factores sigmas requeridos por el proceso a partir de la ecuación de diseño y considerando el flujo del proceso de 600 [HL/h], para ambos casos estipulados (antes de paso por enfriadera y después de paso por enfriadera).

$$\boldsymbol{\Sigma = \frac{\left[\frac{d_p^2 \Delta\rho g}{18\mu}\right]}{Q}}$$

3.2 Variables de proceso: Turbidez, %peso de sedimentos, Concentración de Levaduras, volumen de cerveza filtrada

Se realizaron experimentos en laboratorio físico químico de la empresa CCU, con objetivo de analizar la dependencia de las variables de proceso de filtración; Turbidez [EBC], % peso de sedimentos [%], y concentración de levaduras [millones de células/mL].

Los equipos utilizados para estos experimentos fueron un Turbidímetro nefelométrico para el cálculo de Turbidez, una centrifuga de botellas para el cálculo del %peso de sedimentos, y un Nucleo Counter para medir concentración de levaduras.

3.2.1 Curva Turbidez (Ť) vs %peso de sedimentos

Para el cálculo de esta variable de proceso, se realizaron experimentos para cada caldo madre, se taró en una balanza analítica como la mostrada en la Figura 31, cada tubo Falcon, y en su interior se preparó alrededor de 300 gramos de cerveza para cada experimento; se centrifugó cada muestra a 5000 RPM durante 6 minutos en centrifuga de botellas (ver Figura 30). Luego de esto se secó cada tubo Falcon en estufa por alrededor de 2 horas, con esto se procedió a pesar el contenido seco de cada tubo ensayo y registrar los valores obtenidos. Este procedimiento se realizó en triplicado para cada caldo madre.

$$\%\mathbf{peso}_{\mathbf{solidos}} = \frac{\mathbf{M}_{\mathbf{tubo\ Falcon}} - \mathbf{M}_{\mathbf{muestra\ centrifugada}}}{\mathbf{M}_{\mathbf{tubo\ Falcon}} - \mathbf{M}_{\mathbf{inicial}}}$$

Donde:

$\%peso_{solidos}$: porcentaje en peso de solidos presentes en la muestra [%]

$M_{tubo\ Falcon}$: masa de tubo Falcon utilizado [g]

$M_{muestra\ centrifugada}$: masa de muestra de solidos luego de centrifugar y secar [g]

$M_{inicial}$: masa total de la muestra inicial

Figura 30. Centrifuga de botellas. Fuente: laboratorio físico químico CCU Temuco 2018

Variación de la cantidad de cerveza en la muestra

Para obtener en cada caldo madre, distintos puntos de una curva, se procedió a variar la cantidad de cerveza en peso de la muestra original; se realizaron experimentos para un 100%, 90%, 80%, 70%, y 50% de cantidad de cerveza en peso. El resto de contenido fue añadido a partir de agua des-ionizada.

La turbidez se midió directamente a partir de Turbidímetro para las mismas muestras analizadas previamente, en la figura 32 se muestran las cervezas diluidas al 90, 80, 70 y 50%, también se muestra el equipo Turbidímetro nefelométrico.

Luego de esto se procedió a graficar las mediciones obtenidas, de tal forma que la variable independiente fue la Turbidez y la variable dependiente el % peso de sedimentos.

Figura 31. A la izquierda: balanza analítica. A la derecha: muestra de cerveza no filtrada a analizar. Fuente: laboratorio físico químico CCU Temuco 2018.

3.2.2 Curva Concentración de levaduras (C_{LEV}) vs Turbidez (Ť)

Para el cálculo de esta variable de proceso, se realizaron experimentos para cada caldo madre, la concentración de levaduras fue medida a través del equipo Nucleo Counter, en cual registra el número de células de levadura presente en una muestra es registrado en términos de millones de células por mL de solución de cerveza, el procedimiento se repitió para cada muestra analizada de cada caldo madre; considerando un 100%, 90%, 80%, 70%, y 50% de cantidad de cerveza en peso.

La turbidez se midió directamente a partir de Turbidímetro.

Figura 32. A la izquierda: muestras de cerveza filtradas para anlizar tubidez. A la derecha: equipo Turbidímetro nefelómetrico. Fuente: laboratorio físico químico CCU

Luego de esto se procedió a graficar las mediciones obtenidas, de tal forma que la variable independiente fue la Turbidez, concentración de levaduras y la variable dependiente, concentración de levaduras.

3.2.3 Curva Concentración de levaduras (C_{LEV}) vs %peso de sedimentos (%P_{LEV})

Adicionalmente se obtuvo una curva de manera empírica; es decir igualando las ecuaciones de las regresiones obtenidas; obteniendo así una tercera curva patrón de concentración de levaduras (variable dependiente) y %peso de sedimentos (variable independiente).

3.2.4 Curva Turbidez (Ť) vs Volumen de cerveza filtrada ($V_{FILTRADO}$)

Se relacionaron estas variables del sistema de filtración, a partir de datos registrados por los encargados de proceso del área filtración; el procedimiento consistió en obtener los datos de turbidez (°EBC) previa a la filtración durante el presente año (desde Enero 2018 hasta Julio de 2018), para cada lote de filtración; así como también se obtuvieron los valores de Volumen cerveza filtrada bajo ese mismo lote de filtración (HL/lote), con esto se procedió a graficar estos parámetros para buscar si existe alguna relación entre ellos.

3.3 Estimación de la concentración de células de levadura de diseño

Para el funcionamiento de la centrifuga, se debe especificar al proveedor la cantidad de células de levadura que posee la cerveza a centrifugar, en términos de la cantidad de millones de células de levadura que posea el caldo madre, con este parámetro sumado a la eficiencia de la centrifuga, define la cantidad teórica de células de levadura a la salida de la centrifuga para esa eficiencia determinada.

Para la especificación del número teórico de células de levadura en la entrada de la centrifuga, se obtuvo una base de datos del laboratorio microbiológico de CCU, en este recinto se realizan análisis periódicos de concentración de células de levadura en los tanques de fermentación de cerveza previo a la filtración, estos valores se registran y se le comunican a los encargados de procesos del área de filtración.

Se consideró la base de datos de los últimos 6 meses, se procedió a verificar como es el comportamiento de estos datos a partir de una gráfica de distribución normal de los datos, para así conocer la media de éstos como también el comportamiento de la desviación estándar de los datos y poder estimar de forma correcta la concentración de células de levadura.

3.4 Diseño de simulador de proceso de centrifugación

El diseño del simulador fue implementado a través de Microsoft Excel, la mecánica de este se basa en que los encargados de proceso del área de filtración ingresen el valor de Turbidez previo a la filtración, obtenido por los analistas de laboratorio Físico Químico CCU. y el caldo madre que deseen traspasar, en la Figura 33, se muestra esquema de proceso de filtración en simulador, TCC/TR fermentación representa la cerveza no filtrada, y TCC/TR reposo la cerveza una vez filtrada, el equipo de centrifugación se muestra en la zona central de la figura.

Con este valor el programa calcula automáticamente las otras variables de proceso, como lo es el porcentaje en peso de sedimentos y la concentración de células de levaduras, en función de las ecuaciones características obtenidas de las regresiones de los experimentos ya presentados, estas variables junto con la Turbidez son los parámetros de entrada en el simulador.

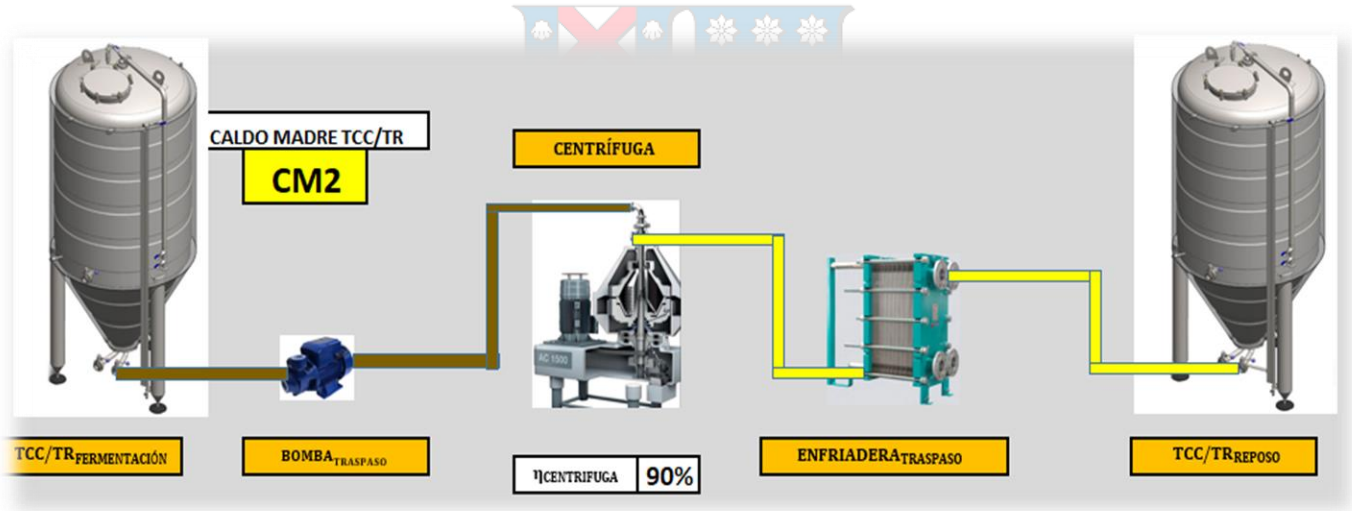


Figura 33. Esquema de zona de centrifugación en simulación CCU. Fuente: elaboración propia.

De acuerdo al porcentaje de eficiencia de la centrifuga escogida, se estudiaron dos casos de centrifugación; centrifugación con concentración de células de levadura en la salida constante (tiempo variable) y centrifugación con tiempo de proceso constante (concentración de células de levadura variable).

3.4.1 Centrifugación con concentración de células de levadura en la salida constante (tiempo variable)

Esta modalidad se basa en que la concentración de células de levadura a la salida de la centrifuga será siempre la misma; esto se logra ajustando la capacidad de la bomba de traspaso a la salida del tanque de fermentación (variando el caudal), con esto se logra que en casos en que la concentración de células de levadura sea superior al valor teórico de diseño, se deba bajar el flujo de la bomba de traspaso de forma tal que la concentración de células de levadura en la salida de la centrifuga sea constante. De forma análoga en caso que las levaduras contenidas en la cerveza previa a filtración sean inferior a la concentración de diseño, se optará por subir el flujo de la bomba de traspaso de forma tal que la concentración de células de levadura en la salida de la centrifuga no cambie.

En la figura 34 se muestra zona de operación del simulador en modalidad de tiempo variable, el encargado de proceso debe introducir los valores del volumen de cerveza en el TCC [HL] y la concentración de células [millones de células/mL].

Estas dos modalidades están limitadas por la capacidad mínima y máxima de la bomba, el flujo mínimo recomendado no debe ser inferior al 50% del flujo nominal de la bomba (flujo mínimo, 300 HL/h), así como también no puede ser mayor a la máxima capacidad hidráulica de la bomba, que corresponde a un 50% más del flujo nominal (flujo máximo, 900HL/h).

Con estas variaciones de flujo en función de la concentración de levaduras en la cerveza, el proceso de traspaso de cervezas entre fermentación y reposo, se deja el tiempo del proceso variable, pues dependerá de la velocidad a la cual esté funcionando la bomba.

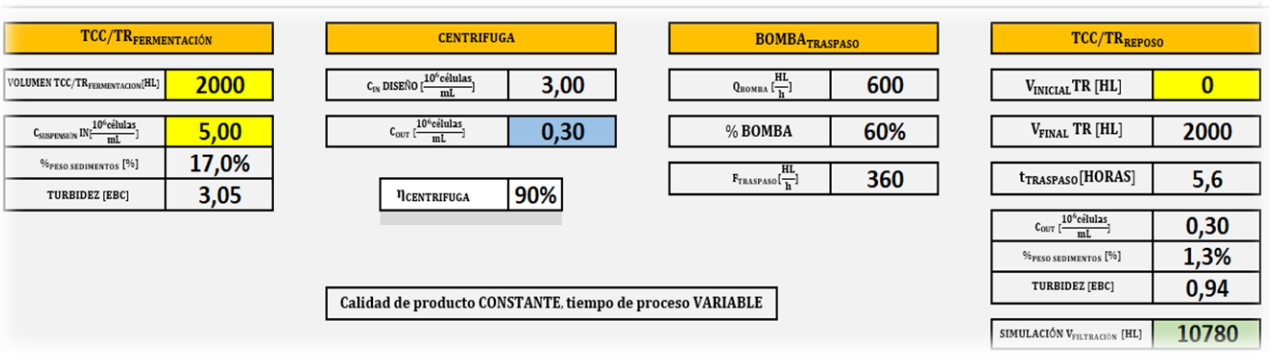


Figura 34. Simulador de centrifugación bajo la modalidad calidad de cerveza constante. Fuente: elaboración propia.

3.4.2 Centrifugación con tiempo de proceso constante (concentración de células de levadura variable).

Esta modalidad se basa en que el tiempo de proceso, es decir el tiempo de traspaso de la cerveza desde el fin de fermentación hasta el inicio de la maduración será siempre el mismo; esto se logra ajustando la bomba de traspaso a un valor único constante e igual al flujo nominal de trabajo (600 HL/h).

En la Figura 35, se visualiza esquema de proceso del simulador en modalidad de tiempo constante; el %Bomba permanece constante así como también el tiempo de traspaso [horas] en azul.

Bajo esta modalidad el tiempo ya queda prestablecido, pero la calidad de la cerveza en términos de la concentración de células de levadura a la salida de la centrifuga queda variable, esto; ya que en caso que el caldo madre provenga con una concentración mayor a la del diseño teórico de la centrifuga, la cerveza en la salida, no saldrá con un valor fijo constante de células, y dependerá de la calidad inicial del caldo madre.

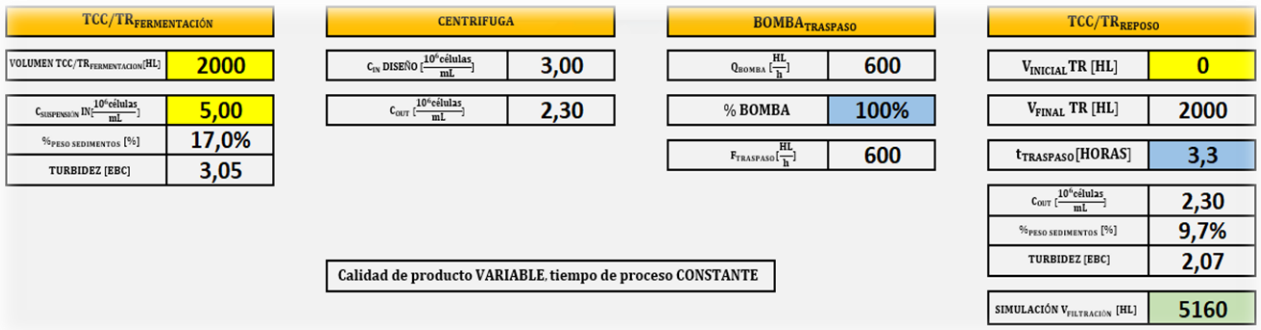


Figura 35. Simulador de centrifugación bajo la modalidad tiempo de proceso constante. Fuente: elaboración propia.

Capítulo IV
RESULTADOS

Capítulo IV: Resultados

4.1 Estimación de factores Sigma de proceso

4.1.1 Densidad del caldo madre (ρ_L)

Para el cálculo, se toma la base de datos de registros de ºP de los últimos 3 meses del año para cada caldo madre, los valores de densidad obtenidos una vez aplicada la conversión de ºP, son los mostrados en la Figura 36, los datos recolectados son para todos los caldos madres producidos durante el periodo.

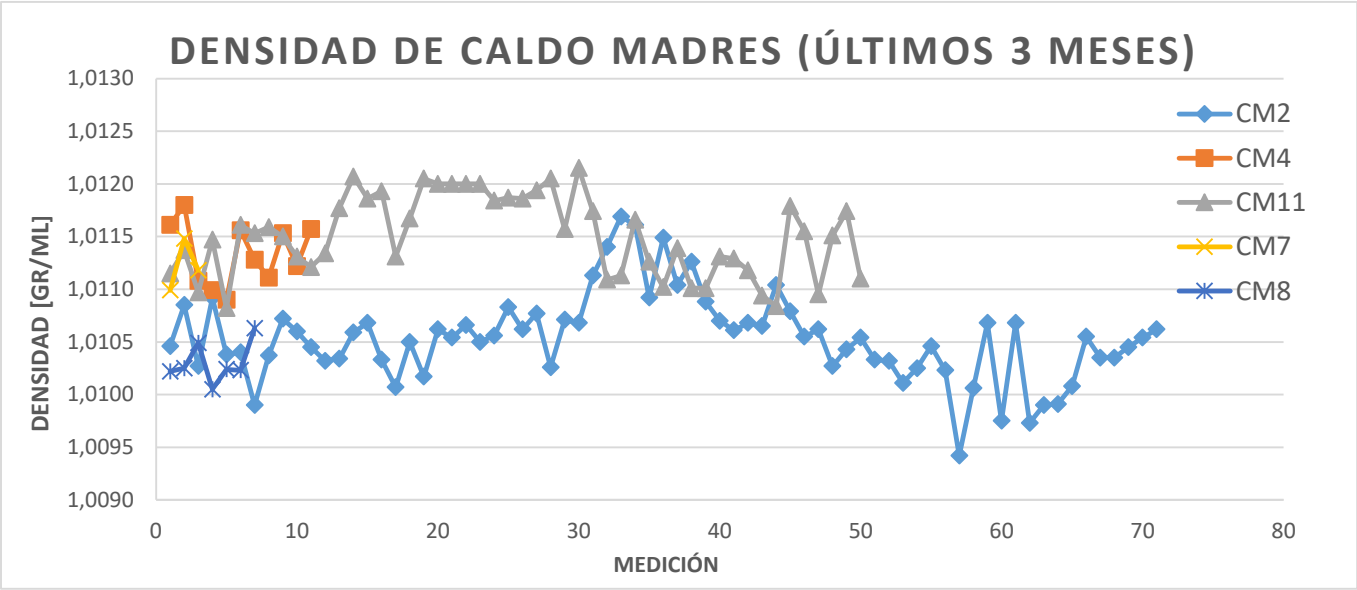


Figura 36. Comportamiento de la densidad de los caldos madres. Fuente: elaboración propia.

En la tabla 2, se muestran los valores promedios de densidad de caldo madres, así como también su desviación estándar, valores en [g/mL].

Tabla 2. Densidades promedio de los caldos madres CCU. Fuente: elaboración propia.

	CM2	CM4	CM7	CM8	CM11
ρ_promedio [g/mL]	1,011	1,011	1,011	1,010	1,012
desv. Estándar [g/mL]	0,00041	0,00030	0,00025	0,00019	0,00038

4.1.2 Densidad del sedimento (ρ_S)

La densidad del sedimento se calculó relacionando la consistencia de la levadura, la densidad del agua líquida a 1 atm y la densidad de la levadura *Saccharomyces Carlsbergensis* en condiciones de peso seco

$$\boldsymbol{\rho_S = C \cdot \rho_{LEVADURA} + \rho_{AGUA} \cdot (1 - C)}$$

Se tomó una serie de datos de los últimos 3 meses con los valores de consistencia de levaduras obtenidas por microbiología, dando con esto un promedio de consistencia de levaduras de un 54%.

Con esto se obtuvo:

$$\boldsymbol{\rho_S = 0,54 \cdot 1,03 + 1,00 \cdot (1 - 0,54)}$$

$$\boldsymbol{\rho_S = 1,016 \left[\frac{g}{mL}\right]}$$

4.1.3 Viscosidad del caldo madre (μ)

Se realizaron las mediciones para caldo madre, en dos secciones del proceso; antes del paso por la enfriadera y después del paso por la enfriadera; esto debido a que la temperatura incide directamente en la magnitud de la viscosidad en los líquidos. ***(Hatschek, Emil 1928),*** en la tabla 3 se muestran los valores de viscosidad aguas debajo de la enfriadera, en la tabla 4 valores de viscosidad aguas arriba de la enfriadera, valores de viscosidad dinámica.

Tabla 3. Viscosidades dinámicas de los distintos caldos madres antes de paso por enfriadera. Fuente: elaboración propia.

	CM2	CM4	CM7	CM8	CM11
μ_promedio [kg/ms]	1,28	1,23	1,29	1,39	1,31
desv. Estándar [kg/ms]	0,058	0,027	0,043	0,051	0,026

Tabla 4. Viscosidades dinámicas de los distintos caldos madres después de paso por enfriadera. Fuente: elaboración propia.

	CM2	CM4	CM7	CM8	CM11
μ_promedio [kg/ms]	1,47	1,46	1,45	1,59	1,48
desv. Estándar [kg/ms]	0,038	0,045	0,033	0,060	0,031

Se obtuvieron los factores Sigma característicos bajo las dos situaciones analizadas, cerveza previa al paso de enfriadera de amoniaco, y cerveza luego del paso por enfriadera.

$$\Sigma = \frac{Q}{\left[\frac{d_p^2 \Delta\rho g}{18\mu}\right]}$$

$$v_g = \left[\frac{d_p^2 \Delta\rho g}{18\mu}\right]$$

A partir de la ecuación de velocidad terminal, se tiene que la viscosidad es inversamente proporcional a la velocidad terminal de la cerveza; el valor que se intenta minimizar es el factor Sigma, ya que este está directamente relacionado con el valor de adquisición del equipo de centrifugación, en la Tabla 5se muestran los factores Sigmas requeridos para cada caldo madre antes de paso por enfriadera, en la Tabla 6 factores Sigmas requeridos para cada caldo madre después de paso por enfriadera, valores entregados corresponden a metros cuadrados.

Tabla 5. Factores Sigmas requeridos para cada caldo madre antes de paso por enfriadera. Fuente: elaboración propia.

Factor Sigma (Σ)	Magnitud [m²]
$\Sigma_{REQUERIDO}\ CM2$	69192
$\Sigma_{REQUERIDO}\ CM4$	77348
$\Sigma_{REQUERIDO}\ CM7$	79244
$\Sigma_{REQUERIDO}\ CM8$	72133
$\Sigma_{REQUERIDO}\ CM11$	85433

Tabla 6. Factores Sigmas requeridos para cada caldo madre después de paso por enfriadera. Fuente: elaboración propia.

Factor Sigma (Σ)	Magnitud [m²]
$\Sigma_{REQUERIDO}\ CM2$	79463
$\Sigma_{REQUERIDO}\ CM4$	91812
$\Sigma_{REQUERIDO}\ CM7$	89073
$\Sigma_{REQUERIDO}\ CM8$	82511
$\Sigma_{REQUERIDO}\ CM11$	96519

Por lo tanto, se debe escoger el caso donde los valores sigma del proceso sean menores, esto se logra con la cerveza previo al paso de enfriadera de amoniaco, debido a que la viscosidad en líquidos es inversamente proporcional a la temperatura del fluido; es decir con una cerveza más fría se tiene una viscosidad más alta, esto hace que la velocidad terminal de la cerveza sea menor, haciendo que el valor sigma se incremente.

4.2 Variables de proceso e intervalos de confianza: Turbidez **(Ť)**, %peso de sedimentos **(%P_{LEV})**, Concentración de Levaduras **(C_{LEV})**, volumen filtrado por lote **($V_{FILTRADO}$)**

Las curvas obtenidas a partir de los datos experimentales se les realizo el ajuste correspondiente, dando en todos los casos estudiados y para cada caldo madre, el mejor ajuste fue el de regresión lineal.

Para el cálculo de los intervalos de confianza se consideró un IC (intervalo de confianza del 90%) en la Figura 37 se muestra curva de recuento celular vs Turbidez para el caldo madre 11, a partir de la regresión obtenida por Microsoft Excel, se procedió a obtener una nueva curva que minimice el error cuadrado medio, a partir del complemento de Excel solver.

En la figura 38 se muestra la gráfica de Turbidez vs %peso de sedimentos para el caldo madre 4, en el eje de las abscisas la variable independiente, Turbidez y en el eje de las ordenadas la variable dependiente, porcentaje en peso de sedimentos, Curva turbidez vs volumen filtrado por lote se muestra en Figura 39.

5.2.1 Curva Recuento celular de levaduras **(C_{LEV}) vs** Turbidez **(Ť)**

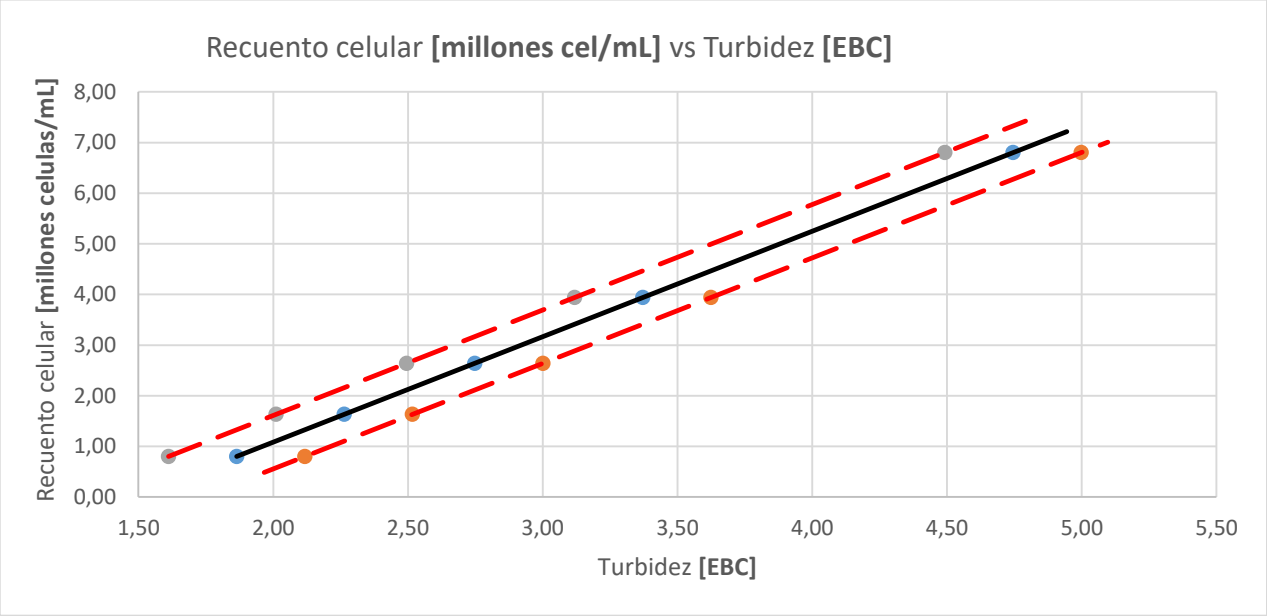


Figura 37. Curva turbidez vs recuento celular de levaduras para el caldo madre 11; intervalos de confianza superior e inferior con línea punteada roja. Intervalos de confianza desarrollados al 95% de certeza. Fuente: elaboración propia.

5.2.2 Curva %peso de sedimentos (%P_{LEV}) vs Turbidez (Ť)

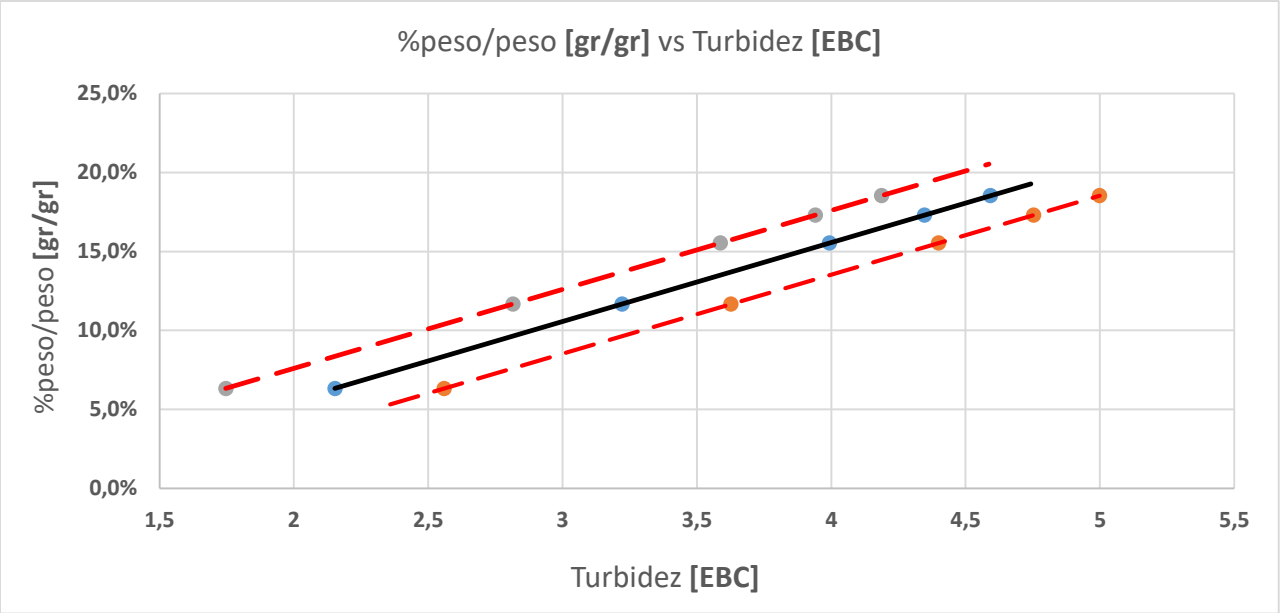


Figura 38. Curva turbidez vs porcentaje peso de sedimentos en cerveza para el caldo madre 4; intervalos de confianza superior e inferior con línea punteada verde. Intervalos de confianza desarrollados al 95% de certeza. Fuente: elaboración propia.

5.2.3 Curva Turbidez (Ť) vs volumen filtrado por lote ($V_{FILTRADO}$)

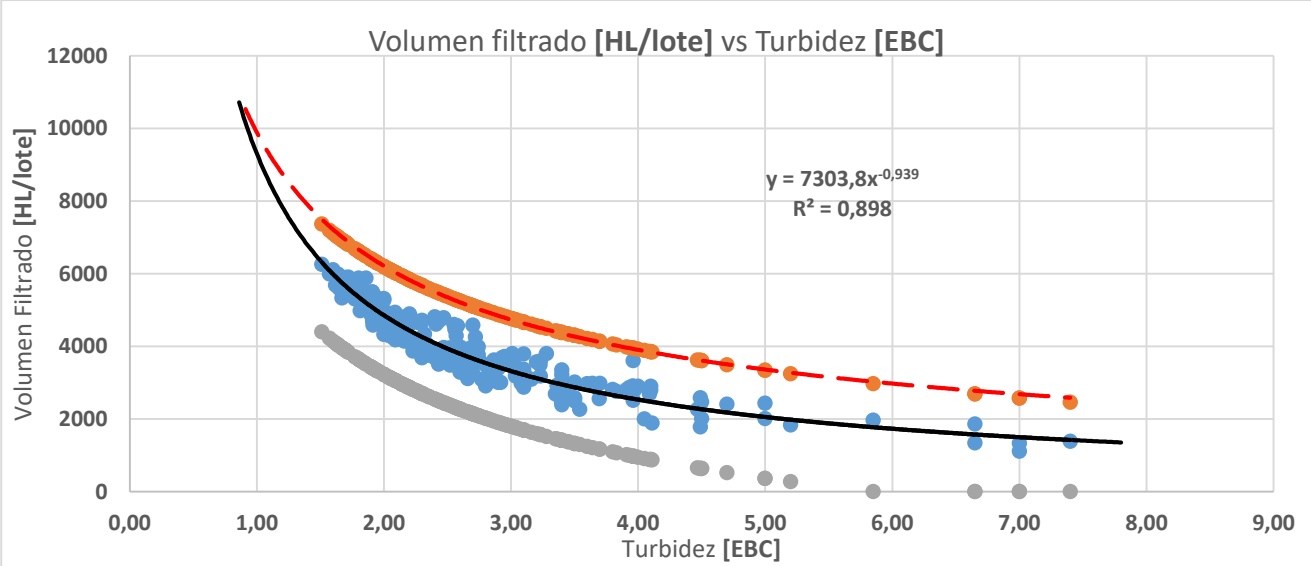


Figura 39. Curva turbidez vs volumen filtrado por lote; intervalo de confianza superior en rojo, intervalo de confianza inferior en gris. Intervalos de confianza desarrollados al 95% de certeza. Fuente: elaboración propia.

4.3 Estimación de la concentración de células de levadura de diseño

Para la especificación del número teórico de células de levadura en la entrada de la centrifuga, se obtuvo una base de datos del laboratorio microbiológico de CCU, en este recinto se realizan análisis periódicos de concentración de células de levadura en los tanques de fermentación de cerveza previo a la filtración, estos valores se registran y se le comunican a los encargados de procesos del área de filtración.

Se consideró la base de datos de los últimos 6 meses, se procedió a verificar como es el comportamiento de estos datos a partir de una gráfica de distribución normal de los datos (Figura 40), para así conocer la media de éstos como también el comportamiento de la desviación estándar de los datos (Tabla 7) y poder estimar de forma correcta la concentración de células de levadura.

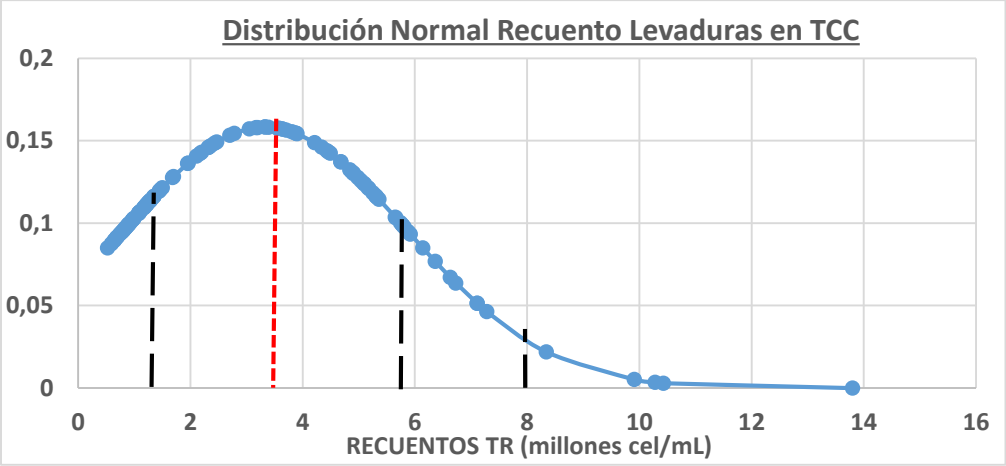


Figura 40. Distribución normal de recuentos de concentración de levaduras en cerveza previa a la filtración. Fuente: elaboración propia.

Tabla 7. Promedio (μ) y desviación estándar (σ), valores en millones de células/mL. Fuente: elaboración propia.

Variable	Valor
μ [millones de células/mL]	3,33
σ [millones de células/mL]	2,52
μ + σ [millones de células/mL]	5,85
μ + 2σ [millones de células/mL]	8,37

Del total de 115 datos obtenidos, se consideró como significativos todos aquellos que sean menores al promedio más dos veces la desviación estándar, es decir todos los datos encontrados con concentración de levaduras mayor a 8,37 millones de células/mL se consideraron como anómalos y fueron apartados de los datos, quedando así con una muestra de 110 datos (5 datos eliminados), en la tabla 8 se muestra el valor final de células de levadura a utilizar en el diseño de la centrifuga.

Tabla 8. Valores de promedio y desviación estándar una vez eliminados anomalías del set de datos. Fuente: elaboración propia.

Promedio	3,00	**[millones cel/mL]**
Desviación estandar	2,00	**[millones cel/mL]**

Con esta última información se tiene que el diseño teórico de concentración de levaduras a la entrada de la centrifuga es de 3,00 millones de células/mL

4.4 Diseño de simulador de proceso de centrifugación

La mecánica del funcionamiento del simulador de centrifugación se basa en los mismos principios para los dos casos desarrollados; centrifugación con concentración de células de levadura en la salida constante (tiempo variable) y centrifugación con tiempo de proceso constante (concentración de células de levadura variable).

Para esto el encargado de proceso, debe ingresar al programa la Turbidez, el volumen de la cerveza en el tanque que será traspasado, y el caldo madre presente en el interior del tanque de fermentación.

El programa automáticamente y a partir de las relaciones de %peso de sedimentos, y concentración de células de levadura; calcula estas variables a partir de la Turbidez ingresada y el correspondiente caldo madre.

La centrifuga seleccionada para el proceso se obtuvo a partir de la recomendación hecha por consultor técnico de empresas ALFA LAVAL, a partir de la información entregada previamente (caudal del proceso 600 HL/h, concentración de células de levadura en la cerveza 3,0 millones de células/mL), con esto la centrifuga que se ajusta al proceso es la CENTRIFUGE BRPX 714 (ver Figura 41), la cual posee una eficiencia del 90%.

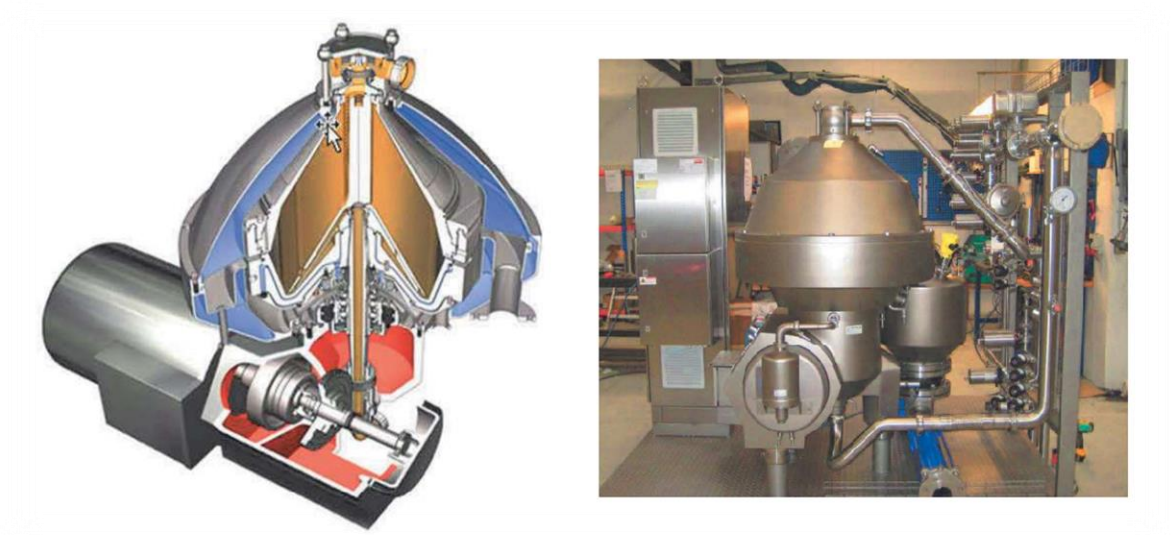


Figura 41. Centrifuga BRPX714, a la izquierda centrifuga vista en corte longitudinal, a la derecha centrifuga operativa en montaje. Fuente: asesor técnico Alfa Laval Chile, Alejandro Aspee +56990339532

Con la eficiencia de remoción de células de levadura ya obtenida, se pueden simular los valores de los parámetros de salida de la centrifuga, concentración de células de levadura, %peso de sedimentos y Turbidez. Además de esto se obtiene el tiempo estimado del proceso, que para el caso de centrifugación con concentración de células de levadura en la salida constante resulta un tiempo del proceso variable, por el otro lado permanecerá fijo para el caso de centrifugación con tiempo de proceso constante.

Adicionalmente con el valor de Turbidez obtenido (0,94 [EBC]), se puede simular cual será el volumen de cerveza filtrada a partir del ajuste potencial en función de la turbidez (10.780 [HL/lote]).

4.5 Calculo de horas de proceso

La función principal de la centrifuga es ahorrar tiempo de proceso, dada la alta eficiencia de implementar la centrifuga en el proceso de filtración los lotes son más óptimos del punto de vista del volumen total filtrado por cada lote.

A continuación, se presenta la proyección de la demanda total de cerveza de la planta para el presente año (Tabla 9).

Tabla 9. Proyección de la demanda de cerveza CCU planta Temuco; 2018. Fuente: elaboración propia.

PROYECCION PRODUCCION TEMUCO 2018 [HL/año]		
CM2	744365	52%
CM4	126360	9%
CM7	42636	3%
CM8	70926	5%
CM11	450989	31%
TOTAL	**1435276**	**100%**

Tiempos de proceso; situación actual

Como ya se mencionó anteriormente (ver capitulo III Marco teórico, Proceso de filtración CCU), el proceso de filtración del filtro Kieselguhr se subdivide en las siguientes etapas: formación de precapas, filtración, recirculaciones, empujes finales.

Para el cálculo de los tiempos actuales de proceso, se registraron los datos de los tiempos de proceso de las etapas del filtro Kieselguhr.

Con la condición de 0,3 [millones de células/mL] en los caldos madres de cerveza antes de ingresar al filtro de tierras, se tiene una Turbidez teórica de 0,94 [EBC], con este valor se puede entrar a la gráfica de volumen de filtración por lote vs Turbidez y obtener un valor de 10.780 [HL de cerveza/lote].

En la tabla 10 se muestran los tiempos de proceso promedio de un lote de filtración de cerveza.

Combinando la proyección de la demanda mensual requerida para el año 2018, con los volúmenes por lote de filtración de la situación actual (2800 [HL/lote]), y el volumen teórico obtenido con centrifuga (10.000 [HL/lote]), se pueden obtener los lotes necesarios para cada mes bajo las dos situaciones estudiadas; situación actual (Figura 42) y situación con centrifuga (Figura 43), esto además se obtienen los lotes de filtración ahorrados producto de la centrifugación previa (Figura 44).

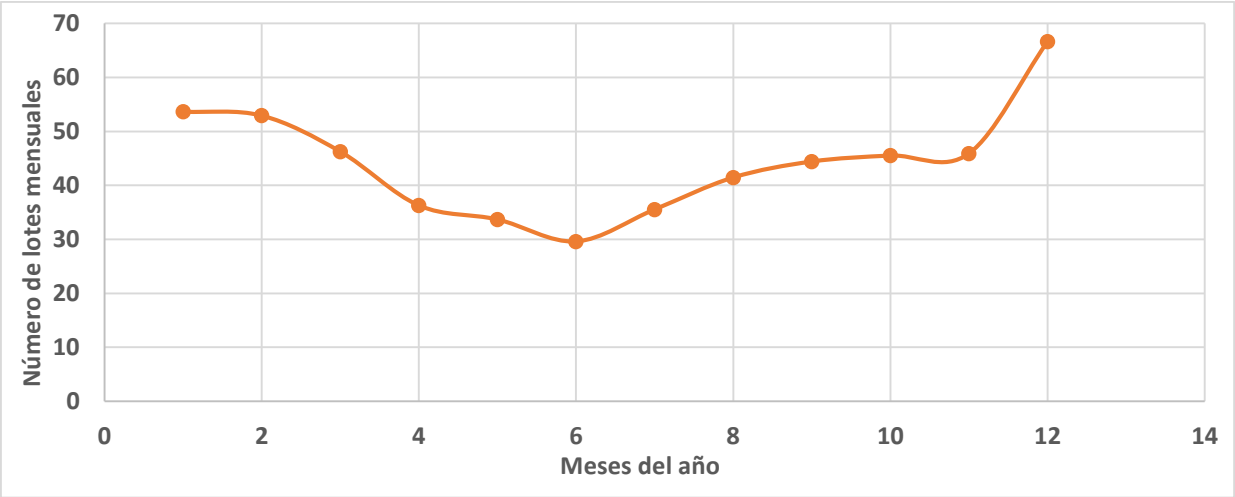


Figura 42. Estimación del número de lotes mensuales en la situación actual, en el eje de abscisas los meses del año. Fuente: elaboración propia.

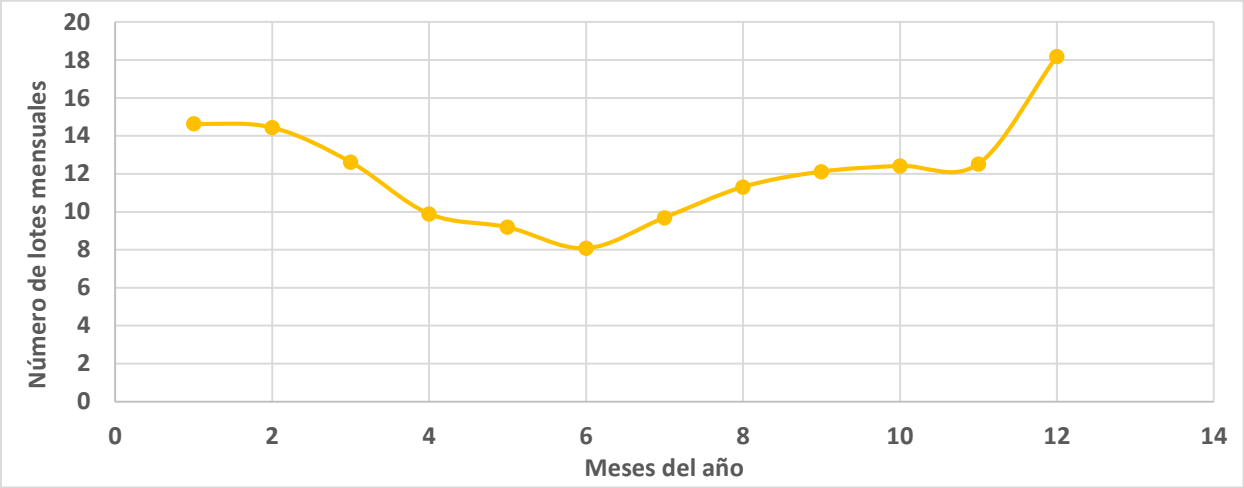


Figura 43. Estimación del número de lotes mensuales con centrifuga, en el eje de abscisas los meses del año. Fuente: elaboración propia.

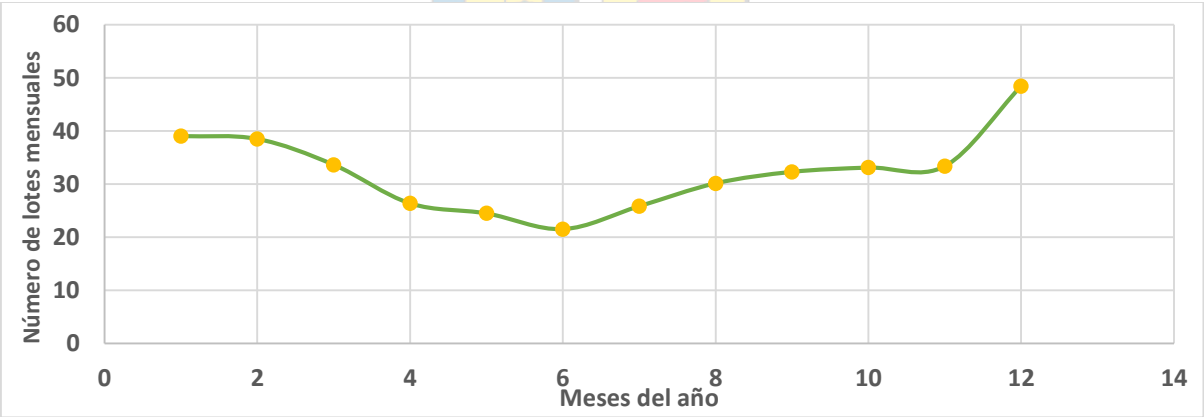


Figura 44. Estimación del número de lotes mensuales ahorrados, en el eje de abscisas los meses del año. Fuente: elaboración propia.

A partir de los gráficos superior se tiene un ahorro de 400 lotes de filtración al año introduciendo la centrifuga al proceso.

Tabla 10. Tiempo de proceso filtro de velas: situación actual. Fuente: elaboración propia.

	TIEMPO [MIN]	TIEMPO [HORAS]	% DEL TIEMPO TOTAL
VOLUMEN lote [HL]	2701		
TIEMPO PRECAPAS	103	1,72	23,3%
TIEMPO FILTRACION	253	4,22	57,2%
TIEMPO RECIRCULACIONES	53	0,88	12,0%
TIEMPO EMPUJES FINALES	33	0,55	7,5%
TIEMPO TOTAL	442	7,37	100%

Para el cálculo del tiempo efectivo de filtración para el caso de centrifuga, se calculó mediante el volumen teórico por lote de filtración con centrifuga (10.780 [HL/lote]), y el flujo nominal de operación del filtro de velas (600 [HL/h]), en la Figura 45 se muestran los tiempos requeridos para la filtración; en la parte superior la situación actual sin centrifuga, y en la parte inferior la situación proyectada con centrifuga.

$$t_{filtracion_{centrifuga}} = \frac{10780\left[\frac{HL}{lote}\right]}{600[\frac{HL}{h}]} \cdot 60\left[\frac{min}{h}\right] = 1078[\frac{min}{lote}]$$

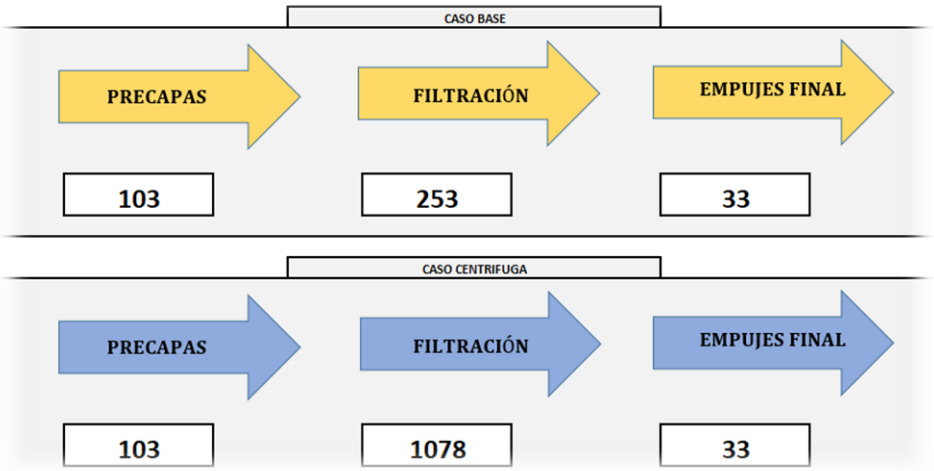


Figura 45. Esquema de comparación de tiempos de proceso de filtro de velas. Arriba caso base actual. Abajo caso con centrifuga. Valores de tiempo en minutos/lote. Fuente: elaboración propia.

Tiempo total anual de proceso

$$t_{proceso\ anual_{ACTUAL}} = \frac{\dfrac{P_{total\ año}\left[\dfrac{HL}{año}\right]}{V_{batch}\left[\dfrac{HL}{lote}\right]}}{\left(t_{precapas} + t_{filtracion} + t_{empujes\ finales}\right)\left[\dfrac{min}{lote}\right]} \cdot 60\left[\frac{min}{h}\right]$$

$$t_{proceso\ anual_{ACTUAL}} = 2697\left[\frac{horas}{año}\right]$$

Para el cálculo del tiempo de proceso anual con centrifuga, es análogo a la fórmula empleada anteriormente, con la salvedad del cambio en el volumen por lote de filtración (10000 [HL/lote]), y el tiempo de filtración (990[min/lote]).

$$t_{proceso\ anual_{CENTRIFUGA}} = \frac{\dfrac{P_{total\ año}\left[\dfrac{HL}{año}\right]}{\mathbf{V_{batch}}\left[\dfrac{\mathbf{HL}}{\mathbf{lote}}\right]}}{\left(t_{precapas} + \mathbf{t_{filtracion}} + t_{empujes\ finales}\right)\left[\dfrac{min}{lote}\right]} \cdot 60\left[\frac{min}{h}\right]$$

$$t_{proceso\ anual_{CENTRIFUGA}} = 1947\left[\frac{horas}{año}\right]$$

Ya obtenidas las horas de proceso al año para cada caso estudiado, se calcula el tiempo total ahorrado en el proceso

$$horas\ de\ proceso\ ahorradas = t_{proceso\ anual_{ACTUAL}} - t_{proceso\ anual_{CENTRIFUGA}}$$

$$horas\ de\ proceso\ ahorradas = 750\left[\frac{horas}{año}\right] = 31\left[\frac{dias}{año}\right]$$

4.6 Evaluación económica

4.6.1 Criterios de evaluación económica del proyecto

El horizonte de tiempo del proyecto se ha fijado en 10 años, más allá de este horizonte temporal, se vuelve complejo predecir cuál va a ser el escenario de la empresa en el mercado cervecero, así como también cómo será el comportamiento del consumo de cerveza nacional, el cual incide en la demanda de cerveza a producir y por consiguiente el uso de la centrifuga.

Es posible someter a reevaluación la continuidad del proyecto si se realizan las mantenciones y reposiciones de equipos necesarias, además de complemetarlo con nuevos estudios de mercado que pronostiquen de manera fehaciente la demanda de cerveza nacional en las próximas décadas, la evaluación del proyecto estará determinada por indicadores de rentabilidad, que muestren la viabilidad económica del mismo.

Valor Actual Neto (VAN): Indicador que contabiliza ingresos y egresos realizados en una empresa en un periodo de operación fijo. Es posible calcular su valor a diferentes años dentro del horizonte de evaluación, y así determinar en qué año la inversión retorna.

Tasa Interna de Retorno (TIR): Tasa efectiva anual compuesta de retorno o tasa de descuento que hace converger el VAN de todos los flujos de efectivo a cero.

Payback: Indicador que se utiliza para evaluar la conveniencia de llevar a cabo determinado proyecto, representando el periodo que demora la inversión es ser cubierta por el mismo.

La moneda utilizada en la evaluación económica corresponde a la moneda nacional Unidad de Fomento (UF), ya que entrega valores reales de flujos de dinero, y considerando el horizonte temporal de la evolución, es recomendable que ésta sea reajustada de acuerdo con la inflación y factores económicos adicionales, se consideran conversión de divisas de euros a UF, los cuales están ajustados a valores de UF a Noviembre de 2018

4.6.2 Selección de la tasa de descuento

La tasa de descuento es un factor financiero que se utiliza, en general, para determinar el valor del dinero en el tiempo y, en particular, para calcular el valor actual de un capital futuro o para evaluar proyectos de inversión, en la Figura 46 se muestran valores típicos de tasa de descuento en función del tipo de proyecto.

Cuando se evalúan proyectos de inversión a nivel de perfil, los flujos de caja se descuentan a una tasa de descuento igual a la tasa de interés activa vigente en el mercado; esto es así porque a nivel de perfil, la exigencia y precisión del estudio es relativa; sin embargo, en la etapa de evaluación del proyecto la tasa de descuento se torna en un dato relevante y esta debe representar el coste del capital del proyecto en particular, es decir, para determinar la tasa de descuento para un proyecto en particular, luego de elaborado el flujo de fondos netos, se debe proceder al cálculo del coste del capital utilizando los métodos o modelos más importantes.

Nivel de riesgo	Prima por riesgo	Ejemplos
Alto	Sobre 20%	Desarrollo de nuevos productos Proyectos que usan conceptos muy novedosos Contratos internacionales
Mediano	10-20%	Proyectos fuera del giro de la empresa Procesos nuevos que no han sido completamente investigados
Promedio	5-10%	Incremento de la capacidad de producción Implementación de una nueva tecnología conocida Proyectos con información de mercado incompleta
Bajo	1-5%	Mejoramiento de la productividad Expansiones de un mercado que se conoce bien y es líder
Muy bajo	0-1%	Reducción de costos Proyectos relativos de seguridad

Figura 46. Valores convencionales de tasa de descuento en función del riesgo (tipo de proyecto). Fuente: *economipedia.com*

En base a esto, se consideró el proyecto de implementación de centrifuga, como la implementación de una nueva tecnología conocida, o también como procesos que no han sido completamente investigados, con esto la tasa de descuento base elegida es de un 15%, se muestra en el análisis de sensibilidad como cambian los indicadores frente a variaciones marginales de este parámetro.

4.6.3 Estructura de costos e ingresos

4.6.3.1 Inversión CAPEX

Para el caso la única inversión asociada a activo fijo es la adquisición de la centrifuga **Alfa Laval separator BRPX 714**, el cual tiene un costo total asociado a la compra y flete por aproximadamente 400.000 [euros], incluyendo el módulo de procesamiento, gabinetes eléctricos, sistema de control PLC SIEMENS 1500, cableados, medidor de vibraciones, medidor de Turbidez SIGRIST en la descarga, set de herramientas.

Se consideraron además 10.000 [euros] por conceptos de costos de montaje y puesta en marcha del equipo; dando así un total de 411.000 [euros] equivalentes a 11.890 [UF] ***(conversor www.nacionales.cl)***

4.6.3.2 Costos variables: Consumo de energía eléctrica

Para calcular el consumo de energía eléctrica, se debe conocer la potencia del equipo [kW], el tiempo de uso del equipo en horas, y el precio de la energía eléctrica en la planta [CLP/kWh], en la Figura 47 se muestra curva de Potencia consumida en función del flujo volumétrico para la centrifuga seleccionada.

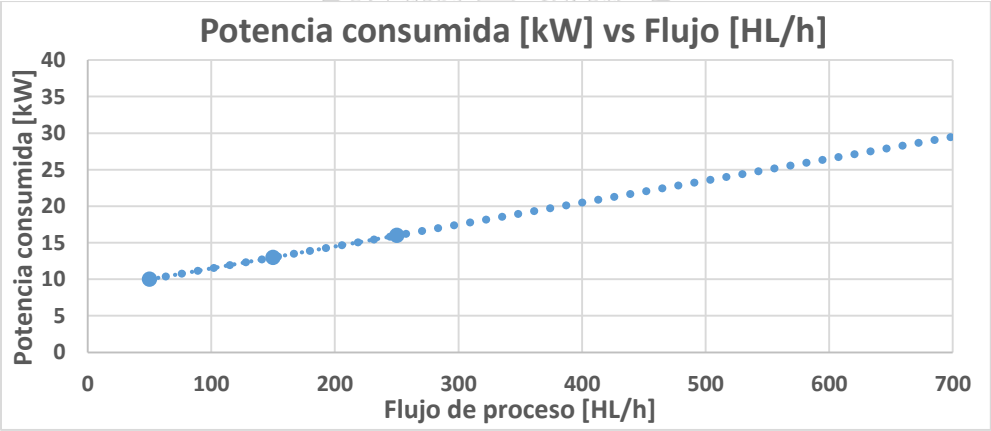


Figura 47. Potencia eléctrica consumida en función del flujo de proceso de la centrifuga BRPX 714, Fuente: alfalaval.com

Con esto se tiene la siguiente relación entre flujo de proceso y potencia consumida:

$$\mathbf{P_{consumida}\ [kW] = 0,03 * Q\left[\frac{HL}{h}\right] + 8,5}$$

Considerando un flujo de proceso de 600 [HL/h] que es la capacidad nominal de la centrifuga, se tiene una potencia consumida de 26,5 [kW].

El tiempo de uso en horas, se obtiene a partir de la producción total anual de la cervecería, y el flujo nominal de la centrifuga (HL/h).

$$t_{uso} = \frac{1435276\left[\frac{\text{HL}}{\text{año}}\right]}{600\,[\frac{HL}{h}]} = 2392\,[\frac{horas}{año}]$$

El precio de la energía eléctrica es proporcionado por los ingenieros de gestión, los cuales manejan los estados de cuentas y facturas de consumo eléctrico, para el caso de elaboración de cerveza es de 90 [CLP/kWh].

$$\mathbf{Gasto_{E.E.}} = \mathbf{P_{CENT}}[\text{kW}] * \mathbf{t_{uso}}[\text{horas}] * \mathbf{Precio_{E.E}}[\frac{\text{CLP}}{\text{kWh}}]$$

Con esto se obtiene un gasto total anual de 5.700.000 [CLP/año] por conceptos de energía eléctrica para una producción de 1.435.276 [HL/año].

4.6.3.3 Ingresos

La evaluación económica del proyecto se realiza mediante un análisis de evaluación de proyectos alternativos, donde existe un caso base sin centrifuga (proyecto defensor), y el caso con centrifuga implementada (proyecto retador), la mecánica del flujo de caja consiste en cargar como ingresos del proyecto retador, los gastos del proyecto defensor, así como también los gastos del proyecto retador son visualizados como ingresos en el proyecto defensor.

En este caso, los ahorros por concepto de consumo de tierras diatomeas que no serán consideradas en el caso con centrifuga (ahorro en precapas y dosificación de tierras Kieselguhr), representan un ingreso del proyecto, el detalle se muestra en la Figura 48.

En la Figura 49 se muestra el flujo de caja base para el proyecto de evaluación de la centrifuga, valores en UF, en la Tabla 11, se muestran los indicadores económicos del proyecto base.

BALANCE DE KIESELGUHR (Tierras FKG)					
CONSUMO TIERRAS $[\frac{kg}{batch}]$	538	Dosificación Primera Precapa $[\frac{kg}{batch}]$	90		
DOSIFICACIÓN TIERRAS $[\frac{gr}{HL}]$	199	Dosificación Segunda Precapa $[\frac{kg}{batch}]$	90	PRECIO TIERRA DIATÓMEAS $[\frac{UF}{ton}]$	$ 18
DOSIFICACIÓN TIERRAS$_{CENTRIFUGA}$ $[\frac{gr}{HL}]$	80				
AHORRO EN TIERRAS$_{DOSIFICACIÓN}$ $[\frac{ton}{año}]$	171	AHORRO EN TIERRAS$_{PRECAPAS}$ $[\frac{ton}{año}]$	72		
CONSUMO ACTUAL TOTAL EN TIERRAS $[\frac{ton}{año}]$	286	TOTAL AHORRO EN TIERRAS $[\frac{ton}{año}]$	243		
		TOTAL AHORRO EN TIERRAS $[\frac{UF}{año}]$	$ 4.374		

Figura 48. Resumen balance de tierras diatomeas Kieselguhr; se muestran dosificación base (proyecto defensor) y dosificación con centrifuga (proyecto retador). Fuente: elaboración propia.

tasa de descuento t_d	15%

valor UF	$ 27.510

ITEM/AÑO	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
INGRESOS											
AHORRO EN TIERRAS (PRECAPAS)		$ 1.292	$ 1.292	$ 1.292	$ 1.292	$ 1.292	$ 1.292	$ 1.292	$ 1.292	$ 1.292	$ 1.292
AHORRO EN TIERRAS (DOSIFICACION)		$ 3.082	$ 3.082	$ 3.082	$ 3.082	$ 3.082	$ 3.082	$ 3.082	$ 3.082	$ 3.082	$ 3.082
AHORRO EN ADITIVOS (Soda, ÁCIDO)											
COSTOS											
ACTIVO FIJO (INVERSIÓN)	$ 11.890										
VARIABLE (GASTO E.E.)		$ 208	$ 208	$ 208	$ 208	$ 208	$ 208	$ 208	$ 208	$ 208	$ 208
GASTOS POR MANTENCIÓN Y CONTINGENCIA		$ 228	$ 228	$ 228	$ 228	$ 228	$ 228	$ 228	$ 228	$ 228	$ 228
FUJO DE CAJA	$ -11.890	$ 3.938	$ 3.938	$ 3.938	$ 3.938	$ 3.938	$ 3.938	$ 3.938	$ 3.938	$ 3.938	$ 3.938
FLUJO CAJA ACTUALIZADO	$ -11.890	$ 3.424	$ 2.978	$ 2.589	$ 2.252	$ 1.958	$ 1.703	$ 1.480	$ 1.287	$ 1.119	$ 973
FLUJO DE CAJA ACTUALIZADO ACUMULADO	$ -11.890	$ -8.466	$ -5.488	$ -2.898	$ -647	$ 1.311	$ 3.014	$ 4.494	$ 5.782	$ 6.901	$ 7.874

Figura 49. Flujo de caja proyecto retador. Fuente: elaboración propia.

Tabla 11. Indicadores económicos proyecto retador. Fuente: Elaboración propia.

TIR	31%
VAN (UF)	7.874
PAYBACK	5 AÑOS
IVAN	0,66

4.6.4 Análisis de sensibilidad

Se analiza el comportamiento de los indicadores económicos (VAN, TIR, Payback), frente a variaciones marginales de algún parámetro de la evaluación económica; producción de cerveza, precio de insumos, gastos de producción, variación de la tasa de descuento, etc.

En la Figura 50 se muestra la variación del Valor Actual Neto frente a variaciones porcentuales de la tasa de descuento.

En la Figura 51, una variación porcentual de la producción de cerveza total anual, hace variar también la Tasa interna de Retorno, al aumentar la producción, se tiene un proyecto más rentable. En la Figura 52, se muestran variaciones porcentuales del uso de la centrifuga respecto a la producción total anual, se tiene que si disminuye la utilización de la centrifuga a un 90%, el Payback del proyecto aumenta hasta 6 años.

En la Figura 53 se muestra que al aumentar el precio de adquisición de las tierras Diatomeas, el proyecto de implementación de la centrifuga se vuelve más rentable, llegando hasta un VAN de 10.000 UF para un aumento del 10% del precio.

4.6.4.1 Variación de la tasa de descuento

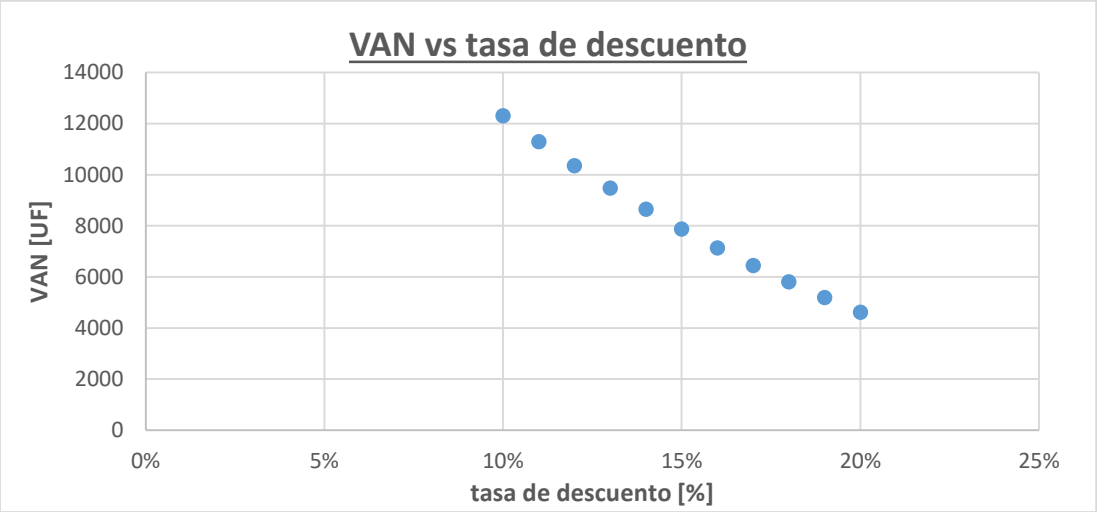


Figura 50. Variación del Valor Actual Neto (VAN) en función de la variación porcentual de la tasa de descuento (td). Fuente: elaboración propia.

4.6.4.2 Variación de la producción de cerveza

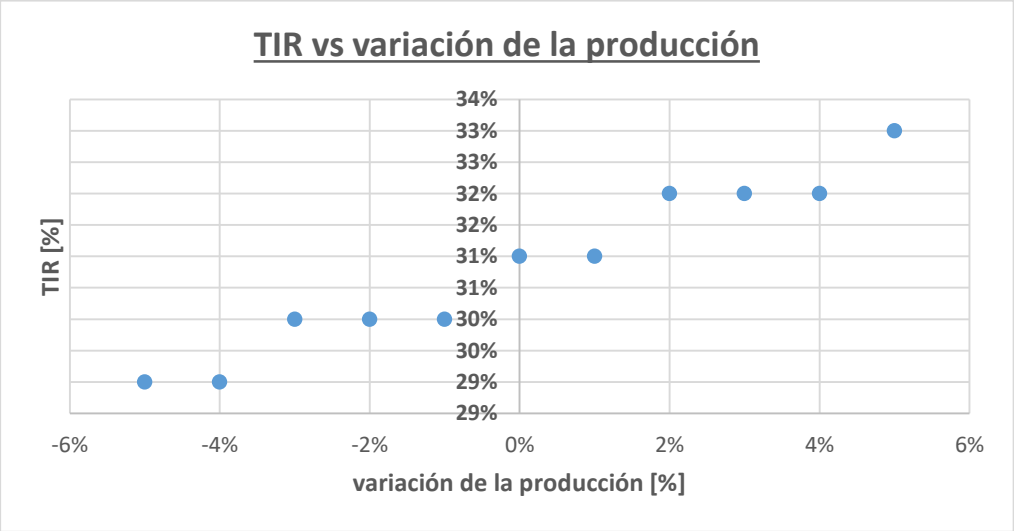


Figura 51. Variación de la Tasa interna de retorno (TIR) en función de la variación porcentual de la producción total anual. Fuente: elaboración propia.

4.6.4.3 Variación del porcentaje de utilización de la centrifuga

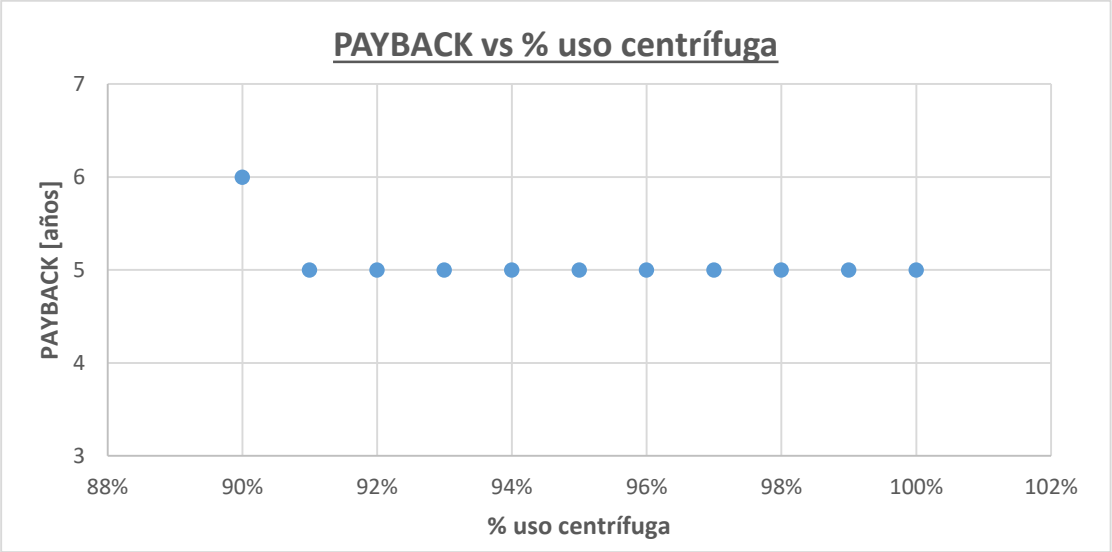


Figura 52. Variación del periodo de pago (PAYBACK) en función de la variación porcentual del tiempo de utilización de la centrifuga. Fuente: elaboración propia.

4.6.4.4 Variación del precio de compra [UF/ton] de tierras Kieselguhr (KG)

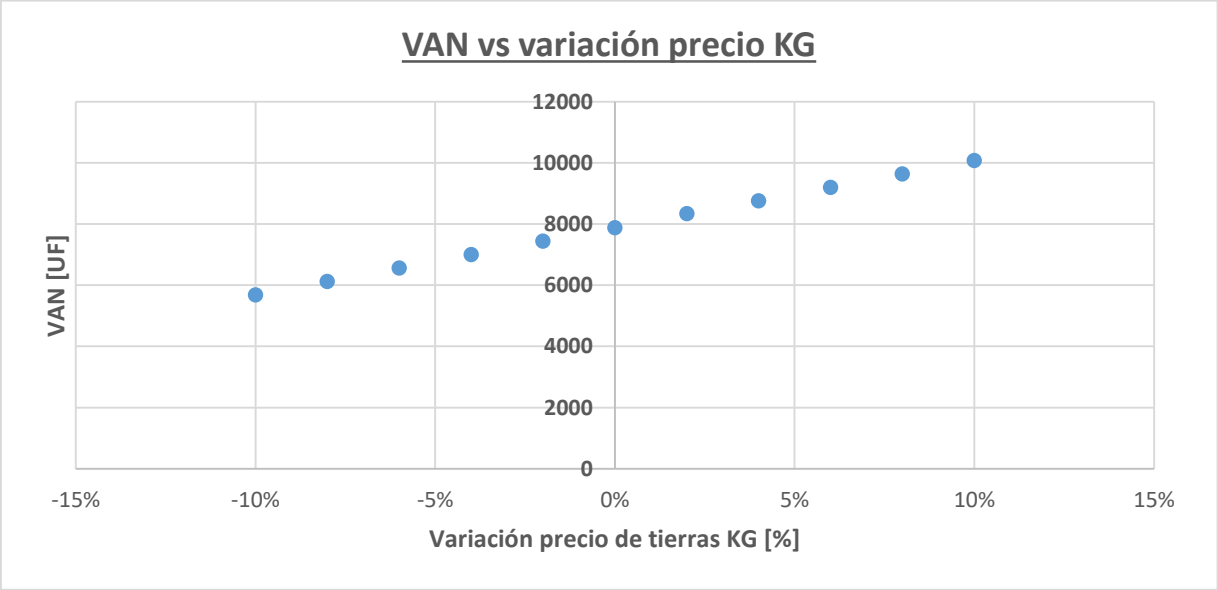


Figura 53. Variación del Valor Actual Neto (VAN) en función de la variación porcentual del precio de compra de tierras Kieselguhr. Fuente: elaboración propia.

Conclusiones y recomendaciones

Actualmente se obtienen lotes de filtración con un volumen promedio de filtración de 2700 [HL/lote], con la implementación de la centrifuga Alfa Laval BRPX 714 se reducen significativamente la cantidad de lotes de filtración al año en torno a los 400 lotes/año, esto es gracias a que con una correcta manipulación del equipo, de las variables físico químicas en la entrada; Turbidez, porcentaje peso de levaduras, y concentración celular de células de levadura se pueden obtener lotes de filtración constante en torno a los 10.800 [HL/lote]

Se concluye además que la implementación de la centrifuga ayuda considerablemente a mantener una correcta seguridad operacional dentro del proceso, esto debido a que se eliminan parte de los procesos en estado transientes de la etapa de filtración de cervezas (puesta en marcha de equipos auxiliares, aseo de líneas y equipos de proceso, detenciones de equipos), con esto se logra una mayor estacionalidad en la etapa de filtración, debido a un mayor tiempo de filtración efectiva del filtro de tierras.

Existen ingresos asociados al ahorro en tierras Kieselguhr, ya que al disminuir los lotes totales anuales, existe un ahorro en tierras por concepto de formación de precapas de lotes de filtración que no serán necesarios, adicionalmente existe un ahorro de tierras Kieselguhr debido a que la implementación de la centrifuga reduce significativamente el gasto en dosificación de tierras, en términos de gramos de [Kieselguhr/HL filtrado], con esto se tiene un ahorro promedio anual cercano a las 250 [toneladas/año] de tierras Kieselguhr, que representan un ahorro cercano a las 4.300 [UF/año].

Respecto a la puesta en marcha del proyecto, se necesita una inversión cercana a las 12.000[UF], que contempla la adquisición de equipos, instalación de equipos y líneas auxiliares y puestas en marcha de éstos.
Se concluye que la evaluación económica entrega indicadores de rentabilidad óptimos (VAN de 8000 UF, TIR de un 31% y un PAYBACK de 5 años), respecto al financiamiento del proyecto, se contempla que éste sea financiado en un 100% con capital propio de la empresa.

Con esto el proyecto de implementación de la tecnología de centrifugación al proceso de filtración CCU resulta una alternativa viable económicamente, como recomendación los indicadores económicos pueden ser mejorados considerablemente si es que se realiza la correspondiente valoración monetaria de las 750 [horas/año] de proceso que son ahorradas; esto pasará por la toma de decisión de la gerencia técnica de la empresa; una alternativa de uso de este tiempo podría ser entregar capacitaciones extra a los personales de planta del área de procesos, de forma tal que puedan complementar al proceso actual con nuevos conocimientos y procedimientos contemporáneos de técnicas de elaboración cervecera, de esta forma poder contribuir a la mejora continua y un diseño sustentable del proceso de elaboración de cerveza.

Bibliografía

Ambler, C.M. 1961. Centrifugation equipment: Theory. Ind. Eng. Chem. 53, 6, 429-433

Axelsson, H.A. 1985. Centrifugation. En: Comprehensive Biotechnology. Moo Young, M. (Ed). Pergamon Press. Oxford. Sección 2, Cap. 21, 325-330.

Bailey, J.E. y Ollis, D.F. 1986. Biochemical Engineering Fundamentals. Segunda Edición. Mc Graw Hill. New York. 1, 10.

Bell, D.J., Hoare, M. y Dunill, P. 1983. The formation of protein precipitates and their centrifugal recovery. En: Advances in Biochemical Engineering/Biotechnology. Vol. 26, Downstream Processing. Springer-Verlag. New York. 1-72.

Belter, P.A., Cussler, E.L. y Hu, W- 1988. Bioseparations: Downstream Processing for Biotechnology. John Wiley and Sons. New York. 3, 47-75.

Bird, R.B., Stewart, W.E. y Lightfoot, E.N. 1964. Fenómenos de transporte. Reverté, S.A. Mexico. 6-14.

Bjurstrom, Ed. 1985. Biotechnology. Chem. Eng. Feb. 18. 126-158.

Brunner, K.H y H. Hemfort. 1988. Centrifugal Separation in Biotechnological Process. En: Downstream Process: Equipment and Techniques. Advances in Biotechnological Process. Vol 8. Mizrahi, A. (Ed.). Alan R. Liss. New York. 1-50.

Jacobs, L, J. y Penney, W.R. 1987. Phase segregation. En: Handbook of Separation Process Technology. Rousseau, R.W. (Ed.). John Wiley and Sons. New York. 3, 129-196.

Moir, D.N. 1988. Sedimentation centrifuges. Chem. Eng . Marzo 28. 42-51.

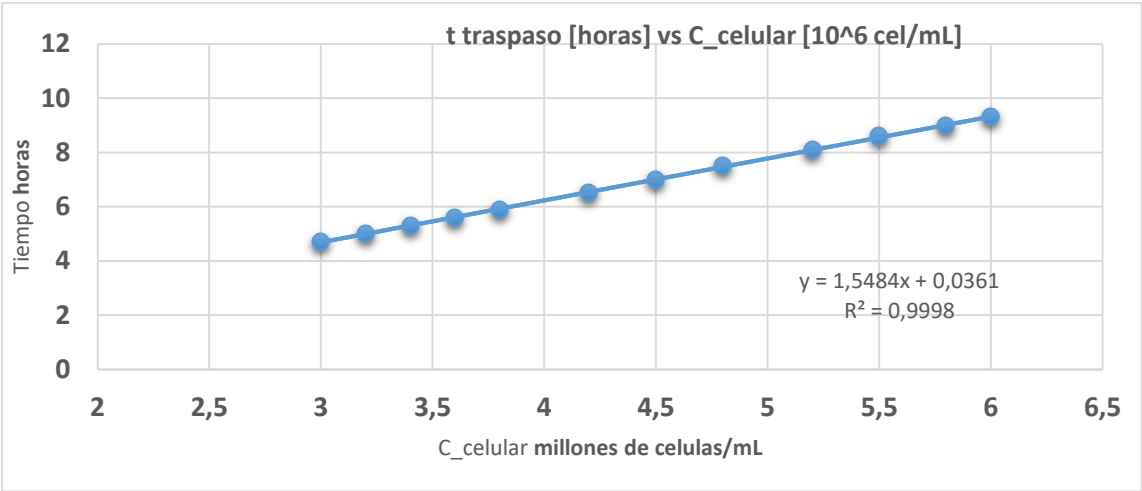
Svarousky, L. 1979. Sedimentation, Centrifugation and flotation. Chemical. Eng. Julio 16. 93-105.

Wiesmann, U y Binder, H. 1982. Biomass separation from liquids by sedimentation and centrifugation. Adv. Biochem. Eng. 24, 119-171.

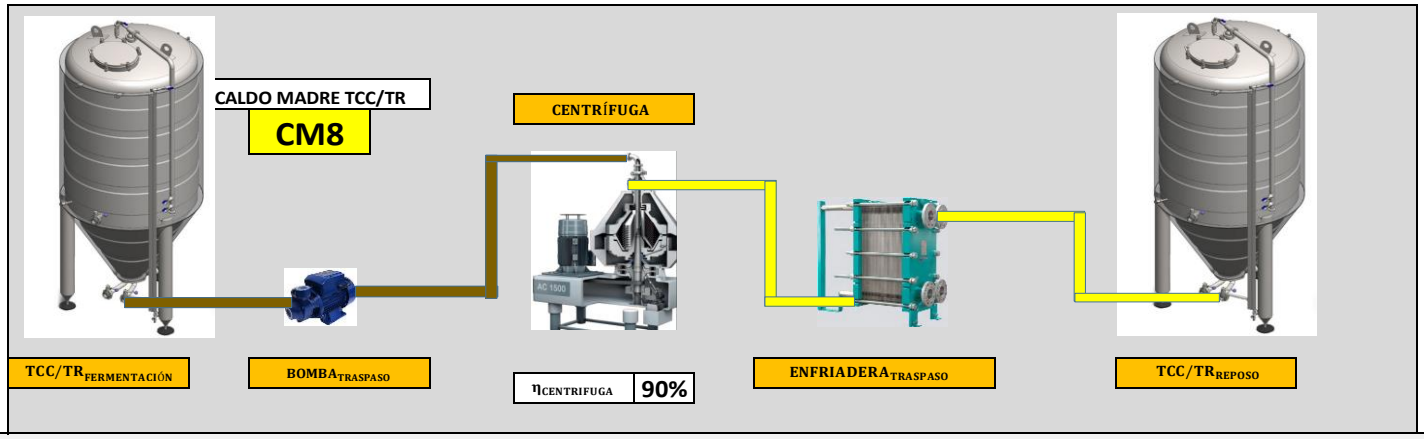
Anexos

Factores de dilución total para los distintos caldos madres

Factores de Dilución total	
CALDO MADRE	
CM2	40%
CM4	25%
CM7	45%
CM8	30%
CM11	30%



Curva de tiempo de traspaso en función de la concentración celular de entrada a la centrifuga



TCC/TR FERMENTACIÓN	
VOLUMEN TCC/TR FERMENTACION [HL]	2000
$C_{SUSPENSIÓN}$ IN [$\frac{10^6 \text{células}}{mL}$]	4,00
%PESO SEDIMENTOS [%]	19,9%
TURBIDEZ [EBC]	2,39

CENTRIFUGA	
C_{IN} DISEÑO [$\frac{10^6 \text{células}}{mL}$]	3,00
C_{OUT} [$\frac{10^6 \text{células}}{mL}$]	0,30
ηCENTRIFUGA	90%

BOMBA TRASPASO	
Q_{BOMBA} [$\frac{HL}{h}$]	600
% BOMBA	75%
$F_{TRASPASO}$ [$\frac{HL}{h}$]	450

TCC/TR REPOSO	
$V_{INICIAL}$ TR [HL]	0
V_{FINAL} TR [HL]	2000
$t_{TRASPASO}$ [HORAS]	4,4
C_{OUT} [$\frac{10^6 \text{células}}{mL}$]	0,30
%PESO SEDIMENTOS [%]	4,4%
TURBIDEZ [EBC]	0,88
SIMULACIÓN $V_{FILTRACIÓN}$ [HL]	10659

Calidad de producto CONSTANTE, tiempo de proceso VARIABLE

TCC/TR FERMENTACIÓN	
VOLUMEN TCC/TR FERMENTACION [HL]	2000
$C_{SUSPENSIÓN}$ IN [$\frac{10^6 \text{células}}{mL}$]	4,00
%PESO SEDIMENTOS [%]	19,9%
TURBIDEZ [EBC]	2,39

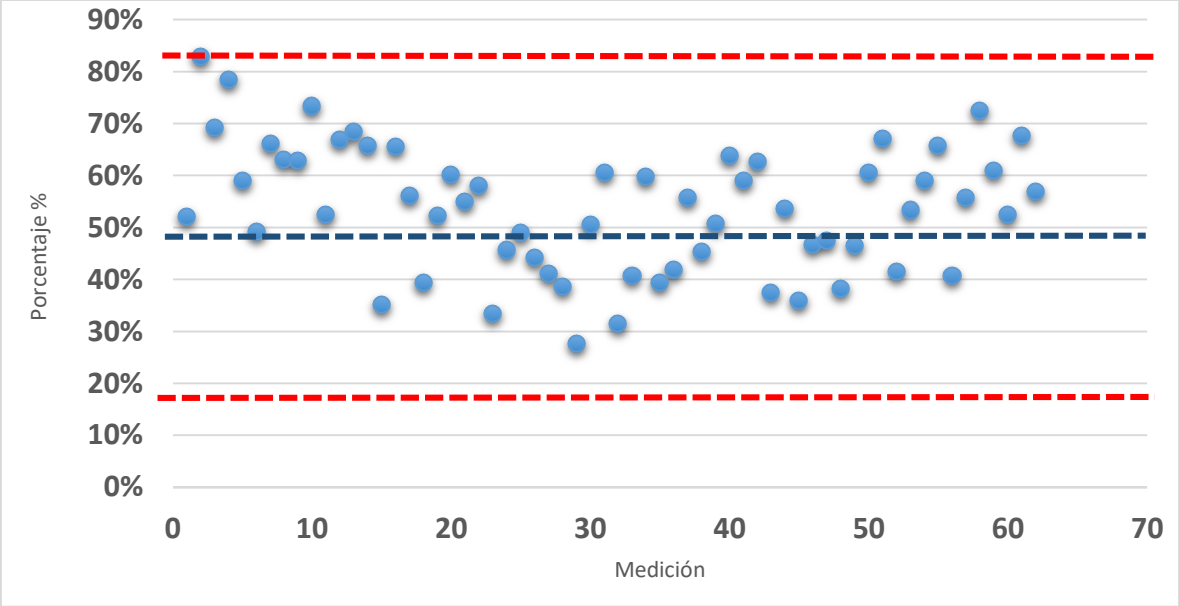
CENTRIFUGA	
C_{IN} DISEÑO [$\frac{10^6 \text{células}}{mL}$]	3,00
C_{OUT} [$\frac{10^6 \text{células}}{mL}$]	1,30

BOMBA TRASPASO	
Q_{BOMBA} [$\frac{HL}{h}$]	600
% BOMBA	100%
$F_{TRASPASO}$ [$\frac{HL}{h}$]	600

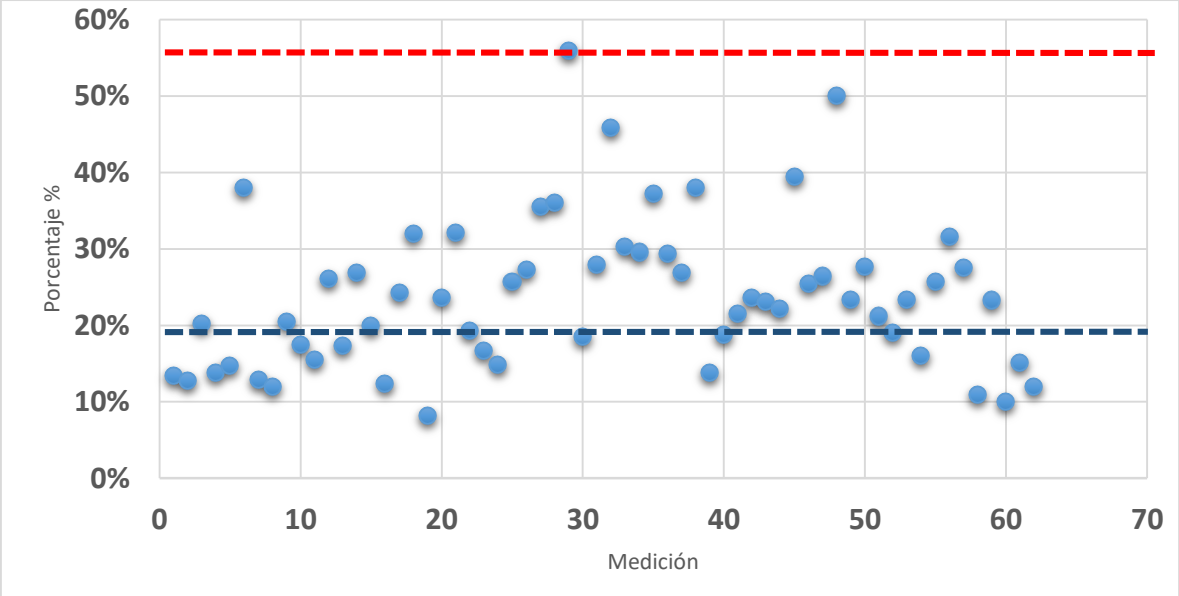
TCC/TR REPOSO	
$V_{INICIAL}$ TR [HL]	0
V_{FINAL} TR [HL]	2000
$t_{TRASPASO}$ [HORAS]	3,3
C_{OUT} [$\frac{10^6 \text{células}}{mL}$]	1,30
%PESO SEDIMENTOS [%]	10,8%
TURBIDEZ [EBC]	1,51
SIMULACIÓN $V_{FILTRACIÓN}$ [HL]	6457

Calidad de producto VARIABLE, tiempo de proceso CONSTANTE

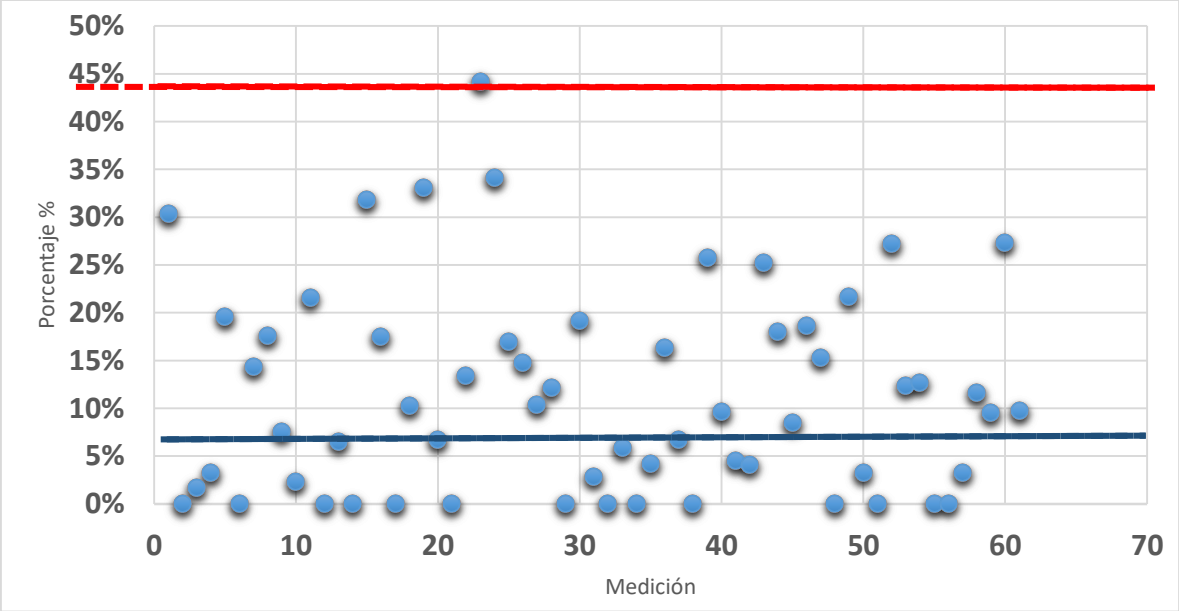
Esquema de diseño de simulador de centrifugación



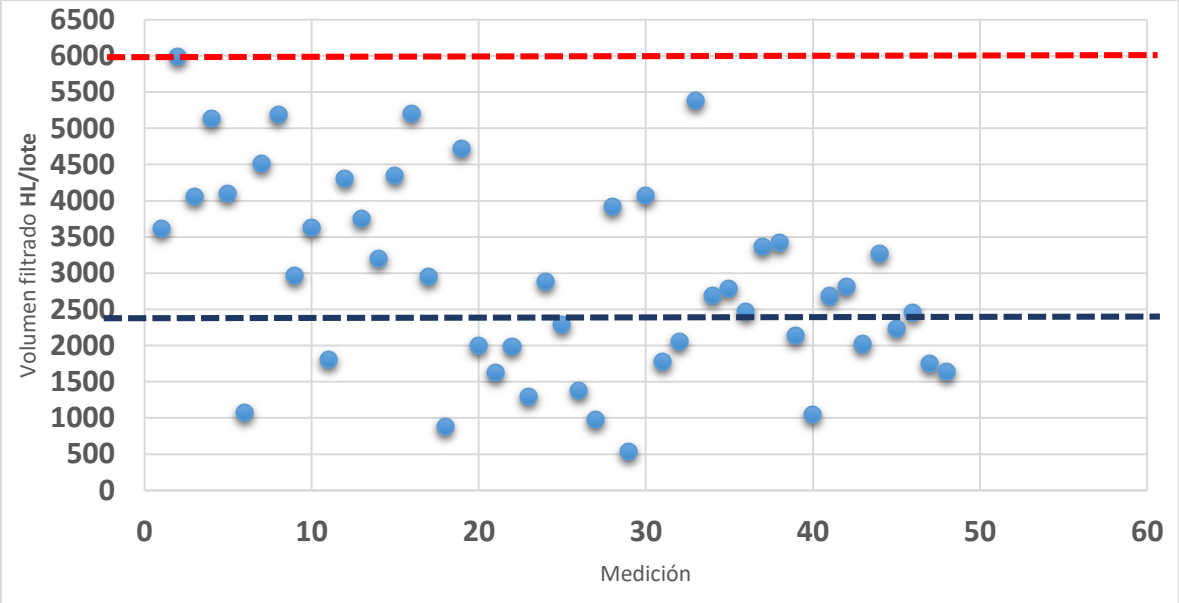
Porcentaje efectivo de tiempo de filtración (eje vertical) vs mediciones de lotes de filtración (horizontal).



Porcentaje efectivo de tiempo de precapas (eje vertical) vs mediciones de lotes de filtración (horizontal).



Porcentaje efectivo de tiempo de Recirculaciones (eje vertical) vs mediciones de lotes de filtración (horizontal).



Volumen total de cerveza filtrada por lote de operación (eje vertical) vs mediciones de lotes de filtración (horizontal).

Velocidades terminales de cada caldo madre, valores en cm/s

v_g (velocidad terminal) cm/s				
CM2	CM4	CM7	CM8	CM11
0,00002409	0,00002155	0,00002103	0,00002311	0,00001951

$\Sigma_{DISPONIBLE}\ [m^2]$	121692

$\Sigma_{REQUERIDO}\ [m^2]$	85433

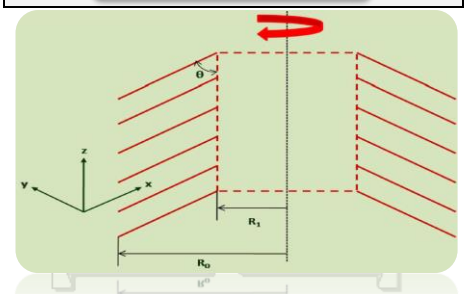
$Q_{PROCESO}\ [\frac{HL}{h}]$	600

VARIABLE	VALOR	UNIDAD
RPM	4800	[RPM]
ω	502	[rad/s]
R_0	30	[cm]
R_1	5	[cm]
θ	0,87	[rad]
θ	50	[grados]
n	100	[discos]

$$Q = [\frac{d_p^2(\rho_s - \rho_L) * g}{18 * \mu}] * [\frac{2\pi * n * \omega^2 * (R_0^3 - R_1^3)}{3 * g * \tan(\theta)}]$$

$$v_g = \frac{d_p^2(\rho_s - \rho_L) * g}{18 * \mu}$$

$$\sum = \frac{2\pi * n * \omega^2 * (R_0^3 - R_1^3)}{3 * g * \tan(\theta)}$$



$\Sigma_{REQUERIDO}$ CM2	69192
$\Sigma_{REQUERIDO}$ CM4	77348
$\Sigma_{REQUERIDO}$ CM7	79244
$\Sigma_{REQUERIDO}$ CM8	72133
$\Sigma_{REQUERIDO}$ CM11	85433

Esquema de diseño de cálculos de Sigma disponibles (equipo de centrifugación) y Sigma requerido (por el Proceso).

Características Filtro KG

Capacidad	600 hl/hr
Área fe filtración	128 m2
Numero de velas	468 unidades
Volumen deposito	69 Hl

Característica filtro PVPP

Capacidad	600 hl/hr
Área filtrante	62.5 m2
Elementos filtrantes	52 placas

Características Filtro Pulidor

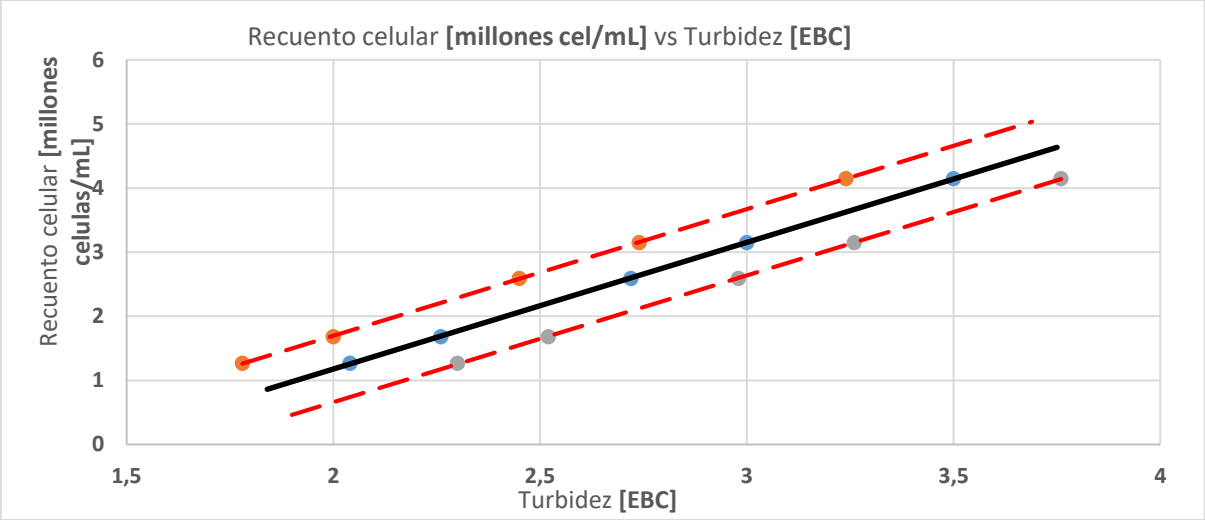
Bujías filtrantes	24 unidades
Área de filtración	43.2 m2
Potencia de retención	3 micras

Capacidad de tanques de preparación de aditivos

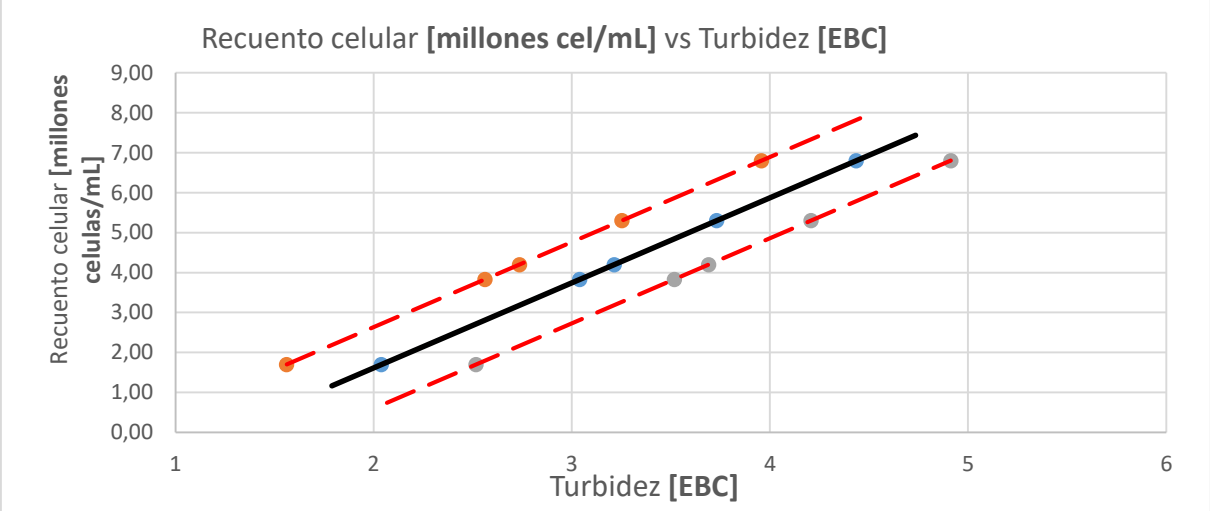
Tanque preparación KG	60 Hl
Tanque preparación KG	20 Hl
Tanque prep. Caramelo	20 Hl
Tanque prep. Espumante (2)	20 Hl

Descripción de los equipos área Filtración

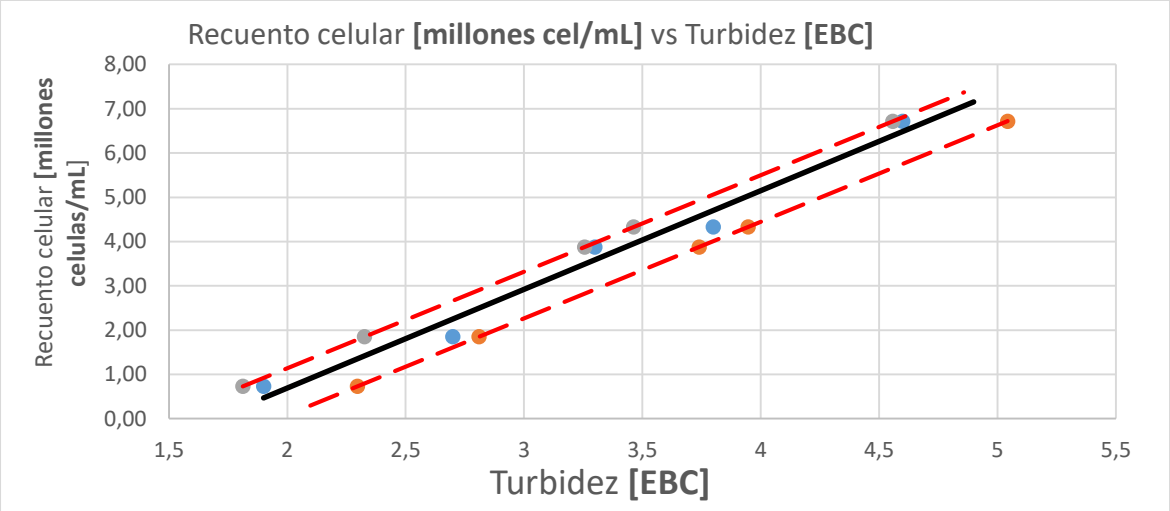
	EQUIPOS FILTRACION-DILUCION		
Cantidad	Equipos	Capacidad	Características
1	**Enfriadera Tubo-Carcaza**	600 hl/hr	Temperatura Enfría: +1,5 / -1,5 °C
1	**Dilución Gruesa (Blender)**	600 hl/hr	Tasa de Dilución: 540-550 hl/hr cerv.
			40- 50 hl/hr cab/cola
1	**Buffer cerv. No Filtrada**	200 Hl	
1	**Filtro de KG**	600 hl/hr	Capacidad = 5 hl/m^2 hr.
			Vol.deposito = 69 Hl
			Area filtración 128 m^2
			Presión servicio = 7 bar
1	**Paquete de bujías Stabos**	468	Distancia entre bujías = 74 mm.
			Largo de bujías = 1368 mm.
1	**Filtro PVPP =**	600 hl/hr	Area filtración = 62,5 m^2
	FS 130 S 90/62,5		47 elementos filtr. Principales = 58,75 m^2
			5 elementos filtr. Restos = 3,75 m^2
			Total = 62,5 m^2
			Malla luz promedio máxima = 55 micras
			Cap. filtro 59,5 Hl - 6 Hl por fierro
			Capacidad Util = 53,5 Hl
			600 hl/hr/60' = 10 hl/min.
			Cada 5' 20" se renueva toda la cerv.
			Tiempo de contacto = 5,35 min.
1	**Dosificador de Tierra**	15 Hl	Bomba dosif.=100-1400 lt/hr
			Tipo = peristáltica SP/25
			Marca = Bredel Hose Holland
			Con dispositivo de CO2
			Presión máxima = 8 bar
1	**Dosificador de PVPP**	61 Hl	Presión servicio = 6 bar
1	**Filtro Tamiz**	600 hl/hr	Bujías filtr.= 24
			Superficie filtr.= 1,8 m^2 por bujía
			Retención 8 micrones/3 micras
			Area filtr. = 43,2 m^2
			Velas marca Sartorius/Filtrox
1	**Silo evacuador fango KG**	200 Hl	
1	**Dilución Fina**	600 hl/hr	
1	**Buffer cerv. filtrada**	12,6 Hl	
1	**Tanque cabeza/cola**	350 Hl	
1	**Carbonatador Steineker**	600 hl/hr	
1	**Tanque preparación KG**	20 Hl	1ra precapa con dispositivo CO^2
1	**Tanque preparación KG**	60 Hl	2da precapa con dispositivo CO^2
2	**Tanques mezcla Manucol**	20 Hl	Con dispositivo CO^2
1	**Dosificador Manucol**	10 Hl	Con dispositivo CO^2
1	**Dosificador Caramelo**	10 Hl	Con dispositivo CO^2
1	**Dosificador Antiox.-Papaina**	10 Hl	Con dispositivo CO^2
1	**Planta Desareadora**	400 hl/hr	



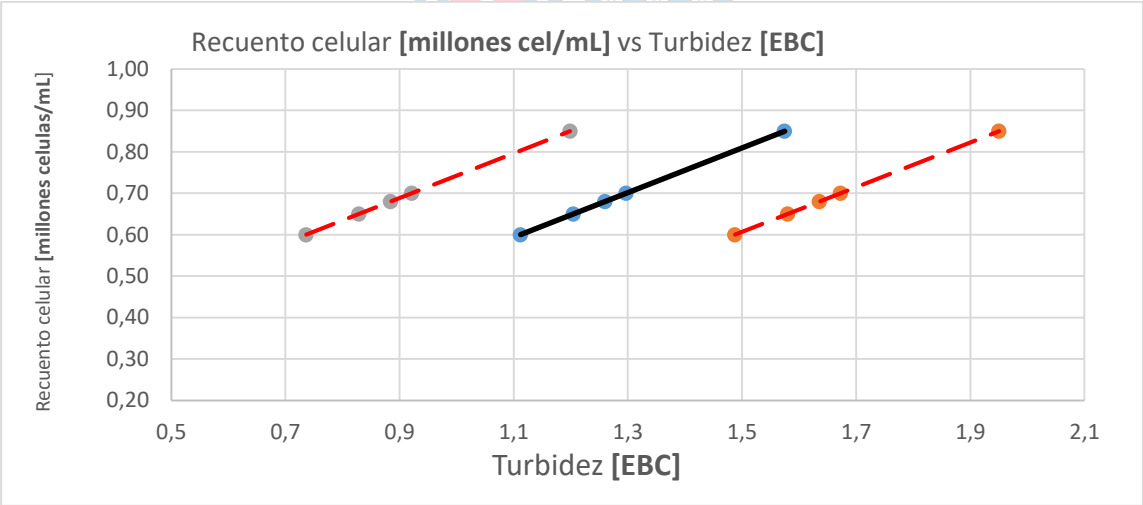
Curva turbidez vs recuento celular de levaduras para el caldo madre 2; intervalos de confianza superior e inferior con línea punteada roja. Intervalos de confianza desarrollados al 95% de certeza



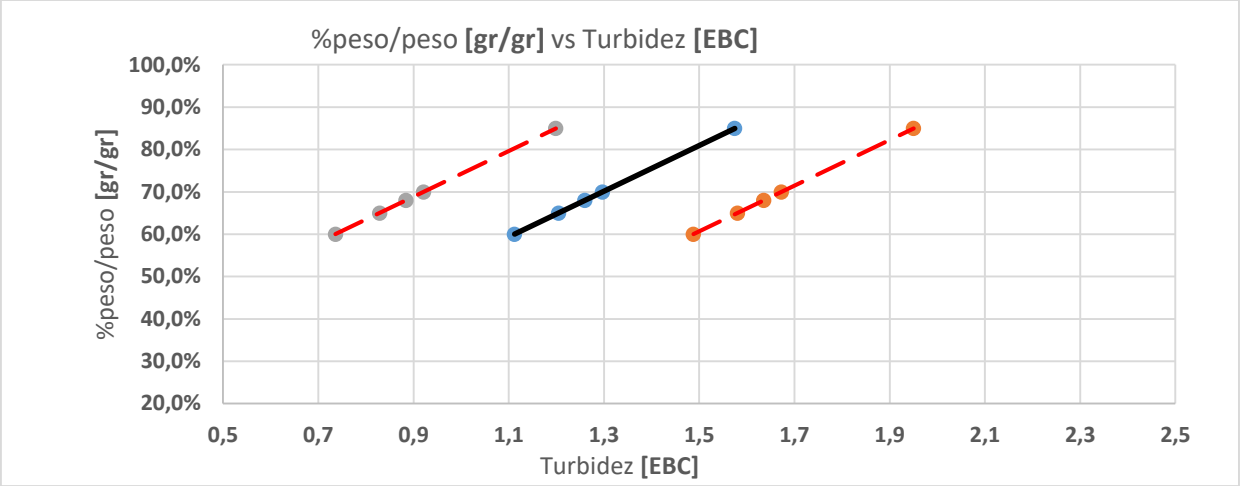
Curva turbidez vs recuento celular de levaduras para el caldo madre 4; intervalos de confianza superior e inferior con línea punteada roja. Intervalos de confianza desarrollados al 95% de certeza



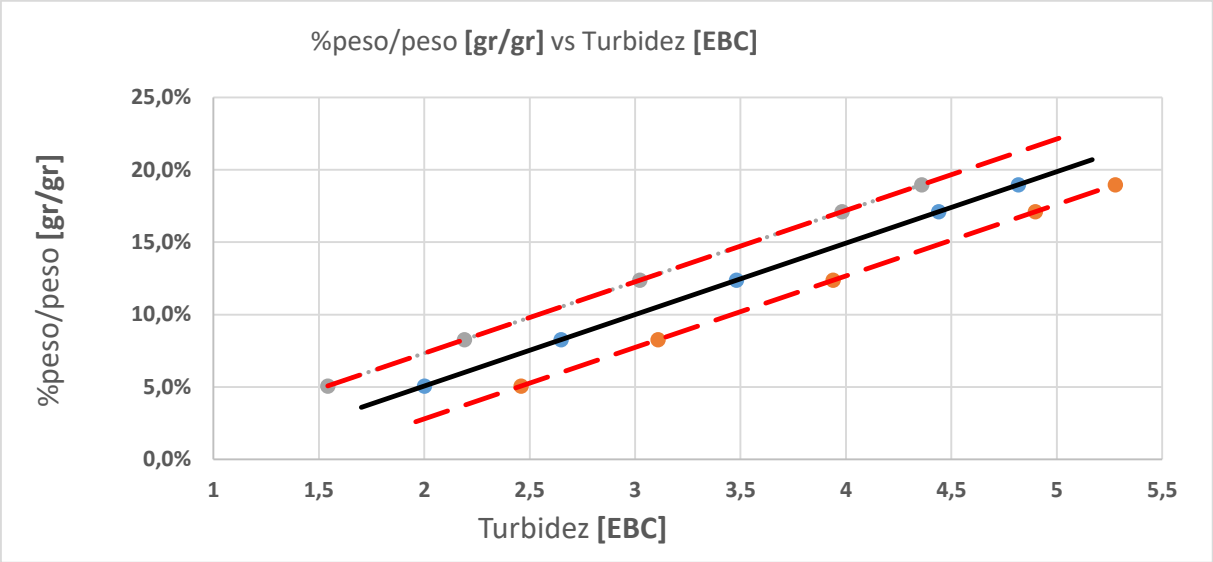
Curva turbidez vs recuento celular de levaduras para el caldo madre 7; intervalos de confianza superior e inferior con línea punteada roja. Intervalos de confianza desarrollados al 95% de certeza



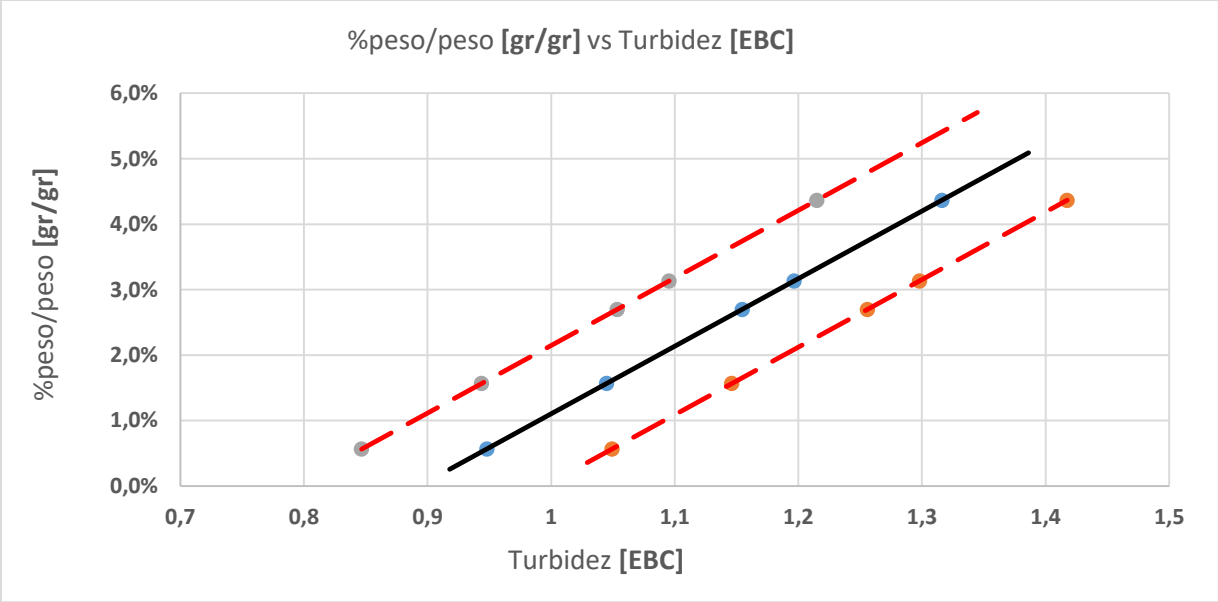
Curva turbidez vs recuento celular de levaduras para el caldo madre 8; intervalos de confianza superior e inferior con línea punteada roja. Intervalos de confianza desarrollados al 95% de certeza



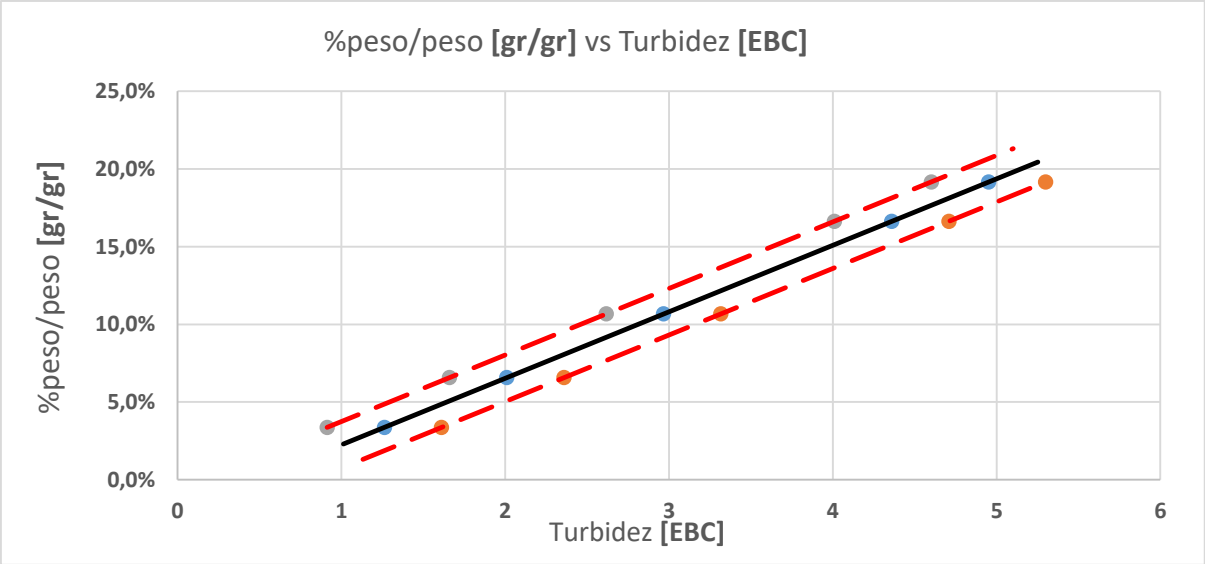
Curva porcentaje peso de sedimentos vs turbidez para el caldo madre 2; intervalos de confianza superior e inferior con línea punteada roja. Intervalos de confianza desarrollados al 95% de certeza



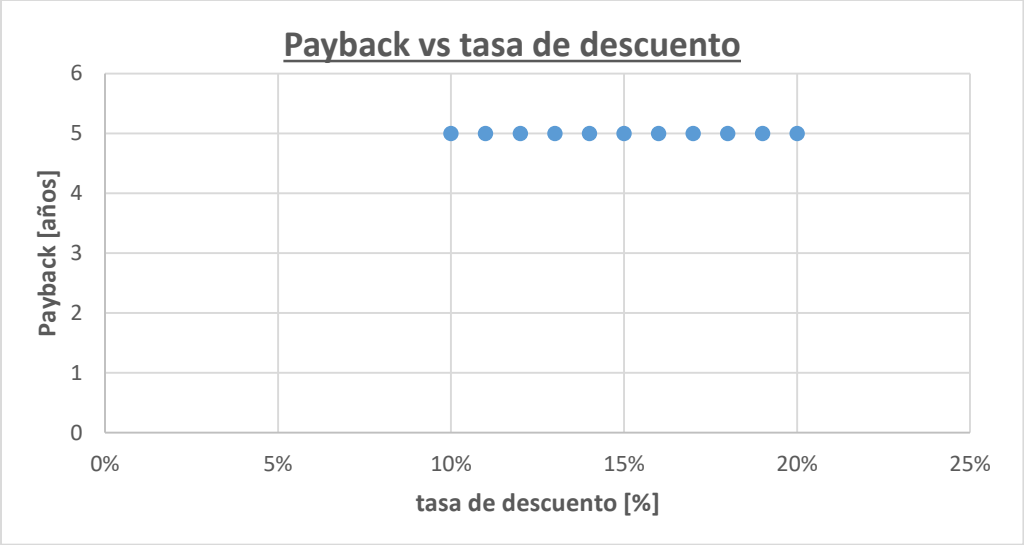
Curva porcentaje peso de sedimentos vs turbidez para el caldo madre 7; intervalos de confianza superior e inferior con línea punteada roja. Intervalos de confianza desarrollados al 95% de certeza



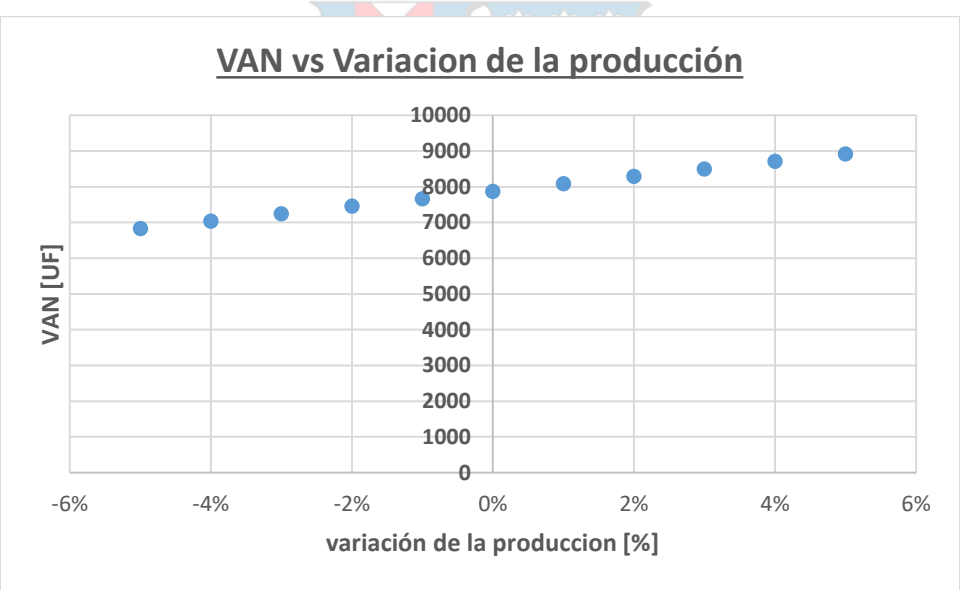
Curva porcentaje peso de sedimentos vs turbidez para el caldo madre 8; intervalos de confianza superior e inferior con línea punteada roja. Intervalos de confianza desarrollados al 95% de certeza



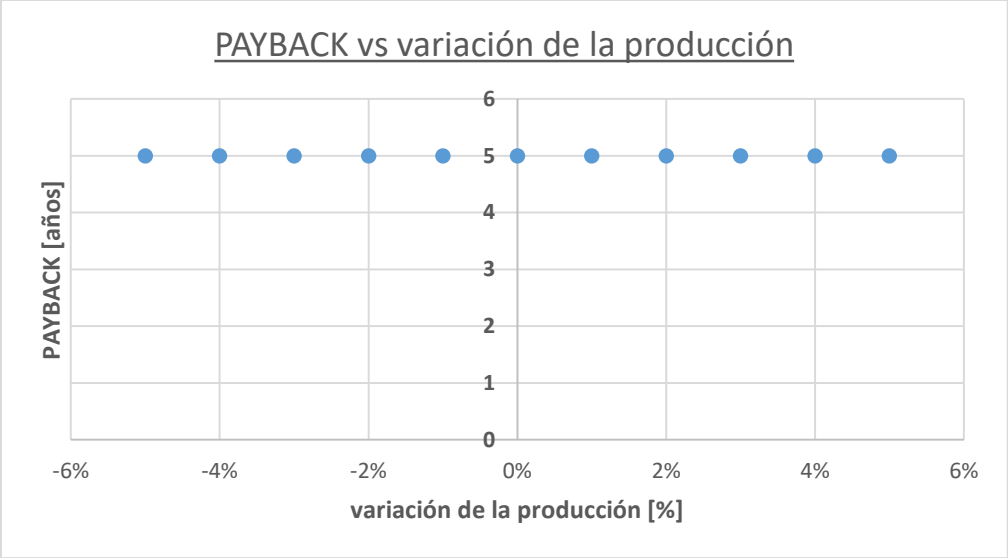
Curva porcentaje peso de sedimentos vs turbidez para el caldo madre 11; intervalos de confianza superior e inferior con línea punteada roja. Intervalos de confianza desarrollados al 95% de certeza



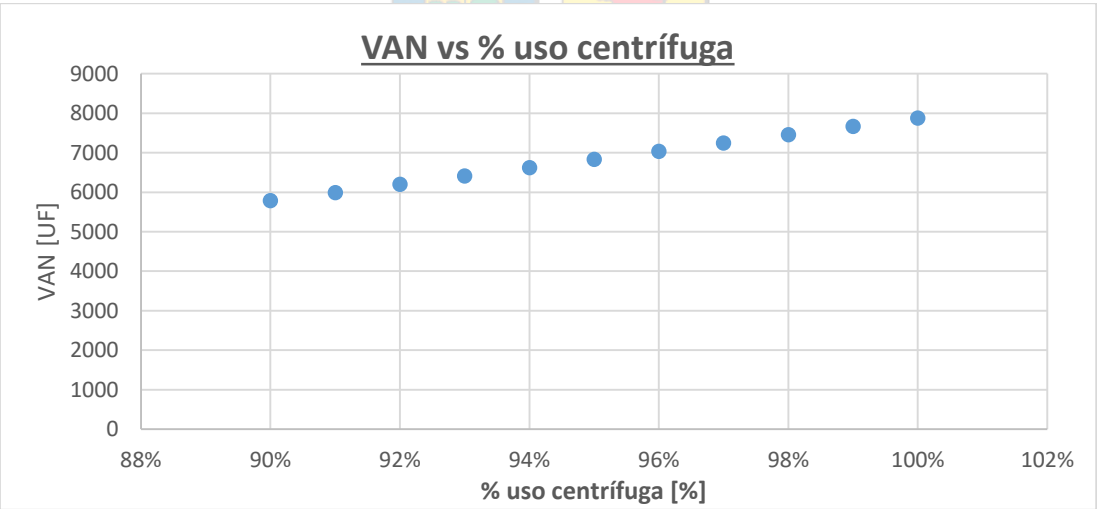
Variación del periodo de pago (PAYBACK) en función de la variación porcentual de la tasa de descuento (td). Fuente: elaboración propia.



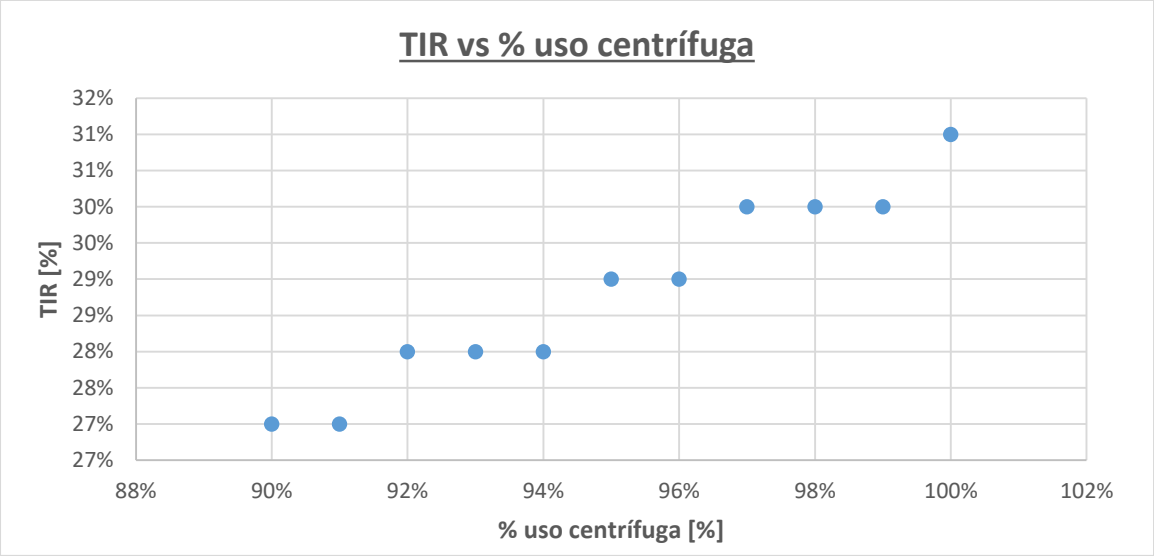
Variación del Valor Actual Neto (VAN) en función de la variación porcentual de la producción total anual. Fuente: elaboración propia.



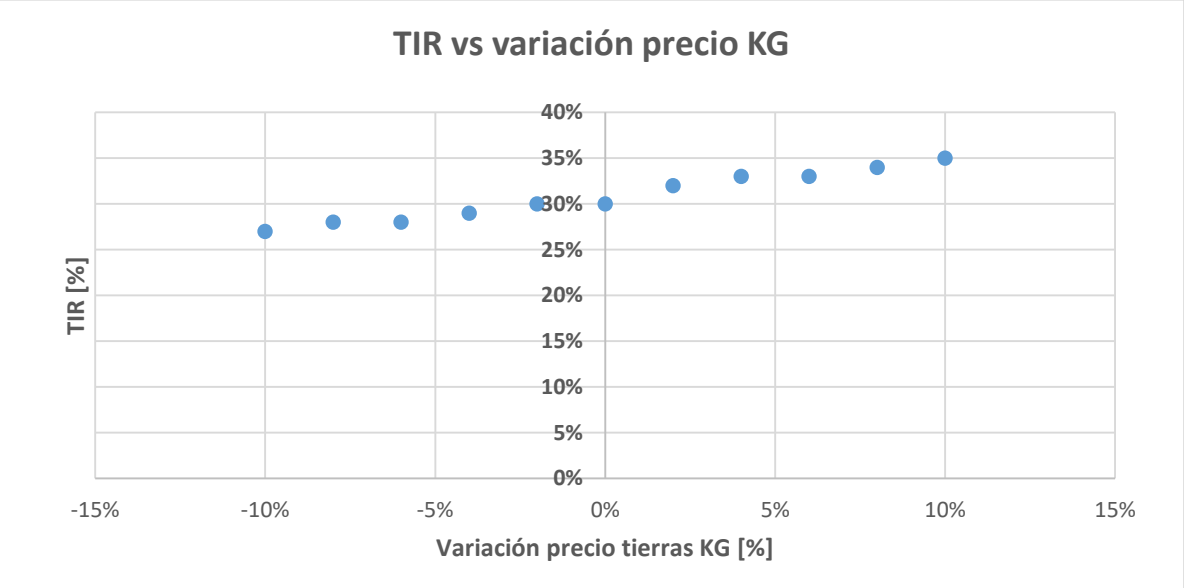
Variación del periodo de pago (PAYBACK) en función de la variación porcentual de la producción total anual. Fuente: elaboración propia.



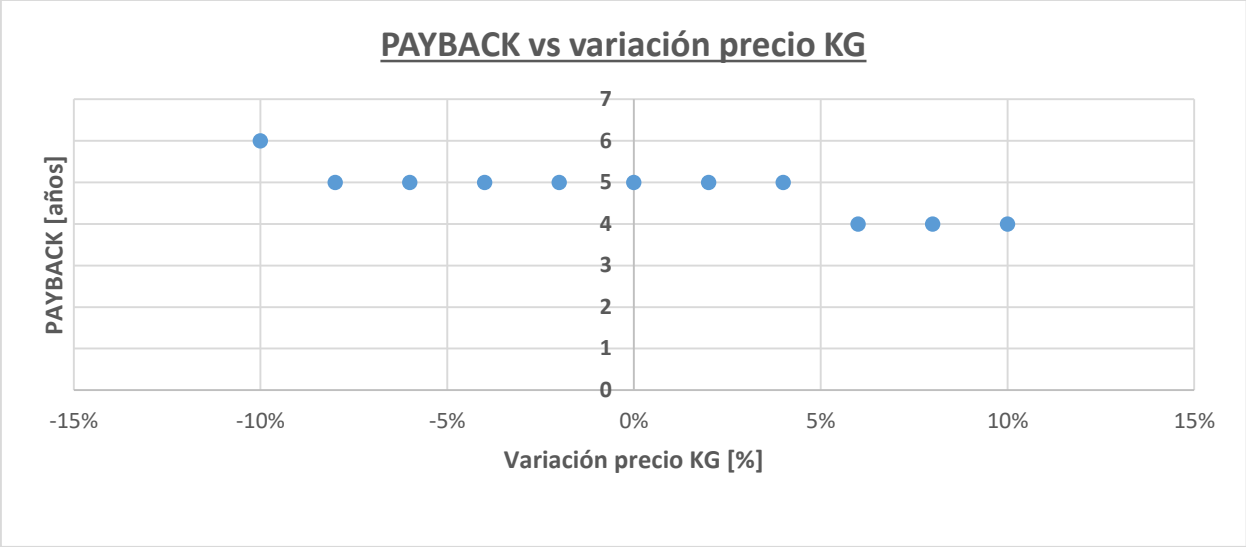
Variación del Valor Actual Neto (VAN) en función de la variación porcentual del tiempo de utilización de la centrifuga. Fuente: elaboración propia.



Variación de la Tasa interna de retorno (TIR) en función de la variación porcentual del tiempo de utilización de la centrifuga. Fuente: elaboración propia.



Variación de la Tasa interna de retorno (TIR) en función de la variación porcentual del precio de compra de tierras Kieselguhr. Fuente: elaboración propia.



Variación del periodo de pago (PAYBACK) en función de la variación porcentual del precio de compra de tierras Kieselguhr. Fuente: elaboración propia.