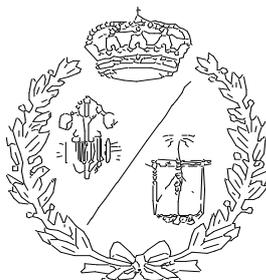


**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS  
INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACIÓN**

**UNIVERSIDAD DE CANTABRIA**



***Trabajo Fin de Grado***

**Estudio de la influencia del diseño de las  
fuerzas de corte en la filtrabilidad del mosto  
de cerveza**

**(Study of the influence of shear forces  
design on the filtrability of beer wort)**

Para acceder al Título de

**GRADUADO EN INGENIERÍA EN  
TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES**

Autor: Jorge Landaluce Rodríguez

Septiembre - 2021





## RESUMEN

El primer paso en la fabricación de la cerveza es la obtención del mosto a partir de las materias primas principales, agua y cebada, normalmente junto con algún otro tipo de cereal, como el maíz. Una vez se forma la mezcla, se calienta hasta diferentes temperaturas en un proceso llamado maceración, y se separa la parte sólida formada principalmente por los trozos de cereal. Este proceso se llama filtración del mosto y es una parte muy importante en el proceso de fabricación.

En el trayecto entre la caldera de maceración y el filtro, la mezcla pasa por un sistema de tuberías donde se encuentran bombas y codos, provocando unas fuerzas de corte en la mezcla. Experimentalmente se sabe que estas fuerzas tienen un efecto negativo en el tiempo que tarda el filtro en separar la parte sólida (formada por trozos de las cáscaras del cereal) del mosto, empeorando un parámetro definido como filtrabilidad. Este fenómeno se origina por una molécula que se encuentra en el cereal llamada  $\beta$ -glucano, la cual sufre transformaciones en las partes turbulentas de las tuberías, provocadas precisamente por esas fuerzas de corte. El proyecto analizará la influencia que tienen esas fuerzas de corte en la filtrabilidad, sin llegar a cuantificar ningún parámetro químico. El principal objetivo del proyecto es mejorar el proceso de fabricación en una fábrica de cerveza optimizando el sistema de tuberías para reducir el tiempo de filtración y aumentar la capacidad de producción.

Para llevar a cabo el estudio, se realizarán diferentes pruebas, que consistirán en simular la filtración de una mezcla a la que previamente se le ha sometido a unas fuerzas de corte. En las pruebas se estudiará la influencia de los codos de las tuberías y las bombas. Por eso mismo, en cada prueba se hará pasar la mezcla por un circuito que incorpora estos elementos, cambiando factores como la velocidad dentro de las tuberías, o revoluciones de la bomba. Una vez se haya hecho pasar por el circuito, se simula la filtración y se mide los parámetros necesarios para cuantificar la filtrabilidad de cada una de las pruebas.

Con los resultados de todas las pruebas se estudiará la influencia de cada elemento y el peso que tiene en la filtrabilidad de la mezcla

## Summary in English

The first step in making beer is to obtain the wort from the main raw materials, water and barley, usually together with some other type of cereal, such as corn. Once the mixture is formed, it is heated to different temperatures in a process called mashing, and the solid part formed mainly by the cereal pieces is separated. This process is called mash filtration and it is a very important part of the manufacturing process.

On the way between the mash tun and the filter, the mixture goes through a pipe system where pumps and elbows are located, causing shear forces in the mixture. Experimentally it is known that these forces have a negative effect on the time it takes for the filter to separate the solid part (formed by pieces of cereal husks) of the wort, worsening a parameter defined as filtrability. This is caused by a molecule found in the cereal called  $\beta$ -glucan, which undergoes transformations in the turbulent parts of the pipes, caused precisely by these shear forces. The project will analyse the influence that these shear forces have on filtrability, without actually quantifying any chemical parameters. The main objective of the project is to improve the manufacturing process in a brewery by optimizing the piping system to reduce filtration time and increase production capacity.

To carry out the study, different tests will be performed, which will consist of simulating the filtration of a mixture that has previously been subjected to shear forces. In the tests the influence of the pipes elbows and the pumps will be studied. For this reason, in each test the mixture will be passed through a circuit that incorporates these elements, changing factors such as the speed within the pipes, or revolutions of the pump. Once it has been passed through the circuit, the filtration is simulated and the parameters necessary to quantify the filterability of each of the tests are measured.

With the results of all tests, the influence of each element and the weight it has on the filtrability of the mixture will be studied.



# ÍNDICE

|          |   |    |
|----------|---|----|
| <b>1</b> | <b>OBJETIVOS</b> .....  | 14 |
| <b>2</b> | <b>INTRODUCCIÓN A LA FABRICACIÓN DE CERVEZA</b> .....           | 16 |
| 2.1      | MATERIAS PRIMAS .....   | 16 |
| 2.2      | PROCESO DE FABRICACIÓN .....                                    | 17 |
| 2.2.1    | Molienda .....  | 18 |
| 2.2.2    | Maceración .....  | 18 |
| 2.2.3    | Filtración .....  | 26 |
| 2.2.4    | Ebullición .....  | 29 |
| 2.2.5    | Clarificación .....   | 31 |
| 2.2.6    | Enfriado del mosto .....  | 32 |
| <b>3</b> | <b>FILTRACIÓN DEL MOSTO</b> .....                               | 34 |
| 3.1      | DIAGRAMA DE OCUPACIÓN .....                                     | 34 |
| 3.2      | EFFECTOS DE LAS FUERZAS DE CORTE EN LA FILTRACIÓN .....         | 37 |
| 3.3      | LEY DE DARCY .....  | 38 |
| 3.4      | COEFICIENTE DE FILTRACIÓN $Fk$ .....                            | 41 |
| <b>4</b> | <b>PRUEBAS LABORATORIO</b> .....                                | 43 |
| 4.1      | DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO .....                                    | 43 |
| 4.1.1    | Molino de martillos .....                                       | 43 |
| 4.1.2    | Planchister .....   | 44 |
| 4.1.3    | Macerador .....   | 45 |
| 4.1.4    | Fk meter .....  | 49 |
| 4.2      | DESCRIPCIÓN DE LAS PRUEBAS .....                                | 50 |
| 4.2.1    | Molienda .....  | 50 |
| 4.2.2    | Maceración .....  | 51 |
| 4.2.3    | Filtración .....  | 55 |
| <b>5</b> | <b>RESULTADOS</b> .....   | 59 |
| 5.1      | RESULTADOS DE LAS PRUEBAS .....                                 | 59 |
| 5.2      | CONCLUSIONES .....  | 65 |
| <b>6</b> | <b>ANEXOS</b> .....   | 71 |
| 6.1      | GRÁFICAS GENERADAS POR EL FK METER PARA TODAS LAS PRUEBAS ..... | 71 |

**7 BIBLIOGRAFÍA..... 87**

## ÍNDICE DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| Figura 2.1 Esquema de las materias primas. ....                                | 16 |
| Figura 2.2 Caldera de maceración. ....   | 20 |
| Figura 2.3 Degradación de almidón durante la maceración ....                   | 21 |
| Figura 2.4: Cambios en la estructura del $\beta$ -glucano. ....                | 22 |
| Figura 2.5 Proceso de infusión mezcla a 50°C. ....                             | 23 |
| Figura 2.6 Proceso de infusión mezcla a 62°C. ....                             | 24 |
| Figura 2.7 Proceso de decocción ....   | 24 |
| Figura 2.8 Maceración con adjunto ....   | 25 |
| Figura 2.9 Composición del extracto. ....                                      | 25 |
| Figura 2.10 Cuba filtro. ....  | 27 |
| Figura 2.11 Filtro prensa. ....  | 28 |
| Figura 2.12 Secuencia de operación del filtro prensa. ....                     | 29 |
| Figura 2.13 Caldera de ebullición con sistema de calentamiento por vapor. .... | 30 |
| Figura 2.14 Corrientes y fuerzas en el Whirlpool. ....                         | 31 |
| Figura 2.15 Whirlpool. ....  | 32 |
| Figura 3.1 Diagrama de ocupación 12 cocimientos diarios. ....                  | 35 |
| Figura 3.2 Diagrama de ocupación 13 cocimientos diarios. ....                  | 36 |
| Figura 3.3 Influencia de las fuerzas de corte en la viscosidad. ....           | 37 |
| Figura 3.4 Formación de fuerzas de corte. ....                                 | 38 |
| Figura 3.5 Recta de Ruth. ....   | 40 |
| Figura 3.6 Recta de Ruth con parámetro $Fk$ . ....                             | 42 |
| Figura 4.1 Molino de martillos. ....   | 44 |
| Figura 4.2 Planchister. ....   | 45 |
| Figura 4.3 Macerador. ....   | 46 |

|   |    |
|---|----|
| Figura 4.4 Placa del motor eléctrico del agitador. ....                           | 47 |
| Figura 4.5 Palas del agitador. ....   | 47 |
| Figura 4.6 Circuito equivalente de tuberías.....                                  | 48 |
| Figura 4.7 Sistema de control de la bomba y el agitador. ....                     | 48 |
| Figura 4.8 Fk meter. ....   | 49 |
| Figura 4.9 Malta antes y después de la molienda. ....                             | 51 |
| Figura 4.10 Proceso de eliminación de los grumos.....                             | 52 |
| Figura 4.11 Test de yodo ....   | 53 |
| Figura 4.12 Curva de maceración de la prueba. ....                                | 53 |
| Figura 4.13 Filtración de mosto en Fk meter.....                                  | 56 |
| Figura 4.14 Pantalla PC Fk meter durante filtración.....                          | 57 |
| Figura 4.15 Torta producida al finalizar la filtración.....                       | 58 |
| Figura 5.1 Recta de Ruth generada por el Fk meter durante la primera prueba ..... | 60 |
| Figura 5.2 Gráfica de los incrementos de $Fk$ .....                               | 67 |
| Figura 6.1 Gráfica FK meter primera muestra sin circuito de tuberías .....        | 71 |
| Figura 6.2 Gráfica FK meter segunda muestra sin circuito de tuberías .....        | 72 |
| Figura 6.3 Gráfica FK meter tercera muestra sin circuito de tuberías .....        | 73 |
| Figura 6.4 Gráfica FK meter primera muestra bomba a 15 Hz.....                    | 74 |
| Figura 6.5 Gráfica FK meter segunda muestra bomba a 15 Hz .....                   | 75 |
| Figura 6.6 Gráfica FK meter tercera muestra bomba a 15 Hz.....                    | 76 |
| Figura 6.7 Gráfica FK meter primera muestra bomba a 30 Hz.....                    | 77 |
| Figura 6.8 Gráfica FK meter segunda muestra bomba a 30 Hz .....                   | 78 |
| Figura 6.9 Gráfica FK meter tercera muestra bomba a 30 Hz.....                    | 79 |
| Figura 6.10 Gráfica FK meter primera muestra bomba a 45 Hz.....                   | 80 |
| Figura 6.11 Gráfica FK meter segunda muestra bomba a 45 Hz .....                  | 81 |
| Figura 6.12 Gráfica FK meter tercera muestra bomba a 45 Hz.....                   | 82 |

Figura 6.13 Gráfica FK meter primera muestra bomba a 30 Hz con restricciones... 83

Figura 6.14 Gráfica FK meter segunda muestra bomba a 30 Hz con restricciones . 84

Figura 6.15 Gráfica FK meter tercera muestra bomba a 30 Hz con restricciones.... 85

## ÍNDICE DE TABLAS

|  |    |
|--|----|
| Tabla 4.1: Pruebas a realizar. ....  | 54 |
| Tabla 5.1: Prueba sin circuito de tuberías, granulometría. ....                | 59 |
| Tabla 5.2: Prueba sin circuito de tuberías, valores de $Fk$ . ....             | 60 |
| Tabla 5.3: Prueba con bomba a 15 Hz, granulometría. ....                       | 61 |
| Tabla 5.4: Prueba con bomba a 15 Hz, valores de $Fk$ . ....                    | 61 |
| Tabla 5.5: Prueba con bomba a 30 Hz, granulometría. ....                       | 62 |
| Tabla 5.6: Prueba con bomba a 30 Hz, valores de $Fk$ ....                      | 62 |
| Tabla 5.7: Prueba con bomba a 45 Hz, granulometría. ....                       | 63 |
| Tabla 5.8: Prueba con bomba a 45 Hz, valores de $Fk$ ....                      | 63 |
| Tabla 5.9: Prueba con bomba a 30 Hz con restricciones, granulometría. ....     | 64 |
| Tabla 5.10: Prueba con bomba a 30 Hz con restricciones, valores de $Fk$ ....   | 64 |
| Tabla 5.11: Granulometría media de todas las pruebas. ....                     | 65 |
| Tabla 5.12: Resultados $Fk$ con la bomba a todas las frecuencias. ....         | 66 |
| Tabla 5.13: Incrementos de $Fk$ con la bomba a todas las frecuencias. ....     | 66 |
| Tabla 5.14: valores de $Fk$ con la bomba a 30 Hz sin y con restricciones. .... | 68 |



## 1 OBJETIVOS

El principal objetivo del estudio es evaluar la influencia que tienen las fuerzas de corte a las que es sometida la mezcla de cereal y agua, en el tiempo que tarda en ser filtrada en un filtro industrial. Para conseguir esto, se buscará una solución para los siguientes puntos:

- El principal problema para cuantificar la filtrabilidad de una mezcla es que depende del tamaño del filtro, por lo que el resultado no es válido para cuantificar la influencia de las fuerzas. Por eso mismo, se debe encontrar un parámetro diferente que sea independiente del filtro y así poder comparar los resultados obtenidos en el laboratorio, con lo que ocurre en una fábrica de cerveza.
- Para medir la filtrabilidad de cada prueba, estas comienzan moliendo los granos de cereal para después mezclarlos con agua y someterlo a unas fuerzas de corte. Para comparar unas pruebas con otras se tiene que asegurar que todos los cambios en la filtrabilidad se deben a las fuerzas de corte, y no a ningún otro parámetro externo. Por esto se tiene que encontrar un método a seguir en todas las pruebas, para que estas sean equivalentes de cara a medir su filtrabilidad.
- Una vez se defina el parámetro de la filtrabilidad y se haya encontrado un método a seguir para todas las pruebas, se medirá la filtrabilidad de todas ellas y se sacarán conclusiones de los resultados obtenidos.

Estos objetivos buscan optimizar la capacidad de producción, reduciendo el tiempo del proceso de filtración en una fábrica de cerveza de cualquier tamaño, ya que se busca que los resultados sean independientes del tamaño de filtro.



## 2 INTRODUCCIÓN A LA FABRICACIÓN DE CERVEZA

La cerveza es una bebida alcohólica fabricada mediante tres procesos bioquímicos principales: la formación de enzimas en el grano de cereal durante la germinación, la transformación del almidón en azúcar debido a la acción de las enzimas, y por último la fermentación de ese azúcar que genera alcohol y CO<sub>2</sub>.

### 2.1 MATERIAS PRIMAS

Para la fabricación de la cerveza se requiere cuatro materias primas: malta, agua, lúpulo y levadura. La calidad de estas tiene una gran influencia en el resultado final, al igual que el conocimiento de las propiedades de estas materias primas y su influencia sobre el proceso.

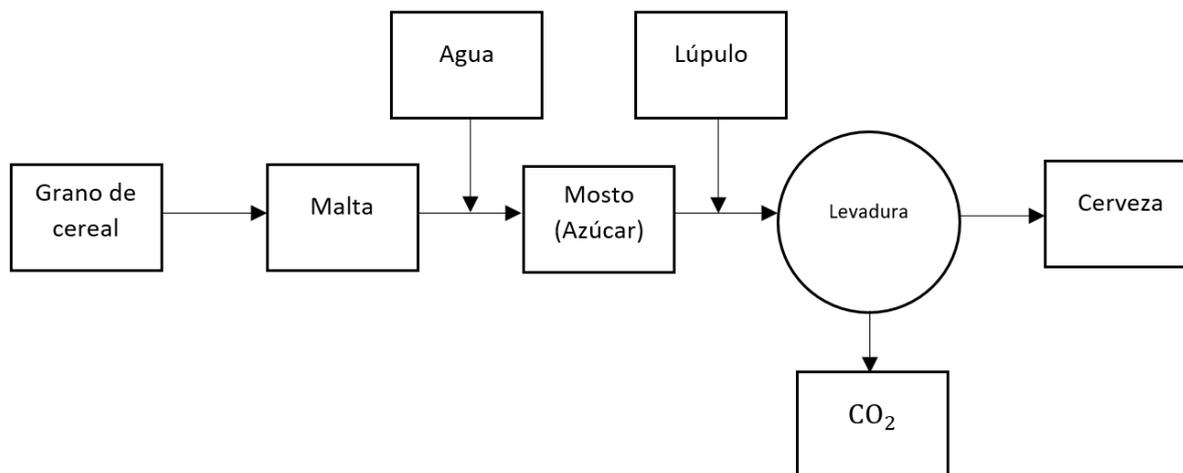


Figura 2.1 Esquema de las materias primas. Elaboración propia.

- La malta es la materia prima principal y normalmente se obtiene del grano de cebada mediante el proceso de malteado, en el que el grano aún sin tratar se sumerge en agua para que empiece a germinar, produciéndose así cambios en este que provocan la generación de grupos de enzimas. Estas son fundamentales para transformar posteriormente el almidón del cereal en azúcar. Una vez generadas las enzimas se retira el agua del proceso y se secan, obteniéndose así la malta.

Aunque la malta de cebada sea la más extendida, también existe de otro tipo de cereales como de trigo, centeno y arroz.

Estas últimas se suelen utilizar como adjuntos. Los adjuntos se mezclan con la malta principal y se utilizan para mejorar el sabor de la cerveza, mejorar la capacidad de la planta, o ahorrar costes de materias primas.

- El agua es la materia prima en mayor proporción. Aproximadamente un 95% de la cerveza es agua.

Tiene que ser de buena calidad y sin impurezas, ya que tiene gran repercusión en el sabor y apariencia final de la cerveza.

- La planta del lúpulo es la encargada de dar el sabor amargo y tiene gran influencia en el aroma. El lúpulo genera una resina que se disuelve en la mezcla cuando esta empieza a hervir.
- Para poder transformar los azúcares en alcohol es fundamental la actividad de la levadura, ya que es necesaria para llevar a cabo el proceso de fermentación.

La levadura es un microorganismo que puede vivir con o sin aire. Cuando no hay aire en el ambiente, absorbe los azúcares y los convierte en alcohol y dióxido de carbono.

## **2.2 PROCESO DE FABRICACIÓN**

La fabricación de la cerveza comienza en la sala de cocción. La cocción tiene como finalidad transformar la malta, adjuntos, lúpulo y agua, en un líquido denominado mosto, al cual se le añadirá más adelante la levadura para empezar el proceso de fermentación. Las principales fases para la obtención del mosto son:

1. Molienda
2. Maceración
3. Filtración
4. Ebullición

5. Clarificación
6. Enfriado del mosto

### **2.2.1 Molienda**

Para que las enzimas de la malta hagan su función deben estar en contacto con la mayor cantidad de agua posible. La molienda tiene como finalidad aumentar la superficie de ataque de las enzimas, triturando la malta. El grado de trituración de la malta dependerá del sistema de filtración del mosto que se emplee dentro de la sala de cocción. Existen tres tipos de molienda:

- Molienda seca: la malta es triturada en seco entre rodillos dispuestos en pares. Entre los pares de rodillos se encuentran tamices vibratorios, que clasifican el material molido del anterior rodillo dependiendo del tamaño. Como alternativa al molino de rodillos se utilizan molinos de martillos cuando es necesario una molienda más fina.
- Molienda húmeda: cuando las cáscaras están secas son frágiles y se resquebrajan fácilmente, por eso para su protección primero se dejan en un periodo de remojo dándoles así un grado de humedad para luego proceder a su moltura. El molino es más sencillo, disponiendo únicamente de un par de rodillos con una tolva en la parte superior.
- Molienda húmeda acondicionada: consiste en solo proporcionar humedad a la cáscara, dejando seco el cuerpo harinoso. El molino es parecido al de la molienda húmeda, pero entre la tolva y los rodillos se incorpora un pozo acondicionar en el que se inyecta agua o vapor de agua.

### **2.2.2 Maceración**

La maceración es el proceso más importante en la fabricación del mosto. En la maceración se mezclan la molienda, los adjuntos y el agua para obtener una sustancia denominada masa. Durante este proceso se le somete a distintas condiciones que, junto con la acción de las enzimas de la malta, concluye en la degradación del almidón en azúcares y otras sustancias de menor peso molecular. La caldera de maceración recibe la mezcla de agua y malta, y en ella tienen lugar las

principales transformaciones en la masa. Estas cubas están hechas de acero inoxidable y tienen forma cilíndrica con un fondo y cúpula cóncavas o cónicas. Además, van equipadas con una chimenea para evacuar los vapores que se desprenden durante el proceso de cocción y un agitador que girará a dos velocidades distintas dependiendo de la fase de la maceración, una más rápida para la recepción de la mezcla, y otra más lenta para la fase estacionaria.

El calentamiento de cuba se puede realizar de dos maneras principales: calentamiento por medio de tubos exteriores semicirculares y calentamiento por inyección directa de vapor. El primero y más utilizado, consiste en un serpentín soldado al exterior de la cuba, al que se le inyecta normalmente vapor de agua en sentido contrario al giro de la mezcla, con presión entre 2 y 3 bar. En el calentamiento por medio de inyección directa de vapor no se pierde calor en el intercambio por las tuberías exteriores, ya que el vapor entrega su calor directamente, sin embargo, tiene la desventaja de que el vapor debe ser puro y libre de aceite, algo que no siempre es posible.

Para el control de la temperatura en la caldera se utiliza una sonda (termopar, termorresistencia), que comparando la temperatura que marque el indicador con una de referencia, mandará la apertura o cierre de la válvula de vapor del circuito de calentamiento.

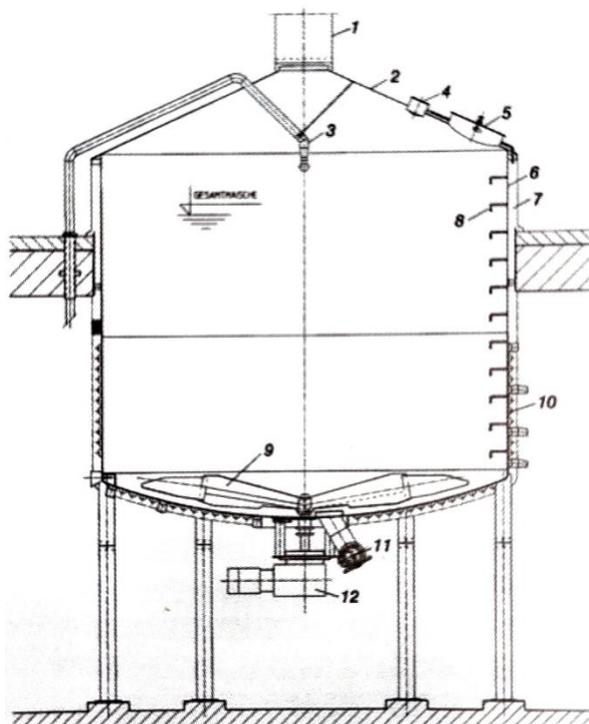


Figura 2.2 Caldera de maceración.

(1) chimenea, (2) fondo superior, (3) limpieza CIP, (4) iluminación interior, (5) boca de inspección y entrada, (6) cuerpo lateral, (7) aislamiento, (8) escalera, (9) agitador, (10) tubos de calefacción, (11) entrada y salida de mosto, (12) motor de accionamiento.

Wolfgang Kunze, 2006

Los procesos químicos más importantes que intervienen durante la maceración son:

- La degradación del almidón:

Un componente fundamental en la cerveza es el alcohol formado en la fermentación de los azúcares. Por ello es necesario que el almidón se degrade en mayor parte en maltosa. Además, el almidón sin degradar tiene una gran repercusión en las características finales de la cerveza. Esta degradación ocurre en tres fases en el siguiente orden:

- Engrudamiento: una vez la solución esté caliente, el agua se incorpora a las moléculas de almidón, facilitando el posterior ataque enzimático por parte de las enzimas de la malta. En esta fase se produce un aumento de viscosidad en la masa.
- Licuefacción: se rompen las largas cadenas de almidón enzimáticamente por la acción de la enzima  $\alpha$ -amilasa. La viscosidad disminuye muy rápidamente.
- Sacarificación: degradación completa del almidón a maltosa y dextrinas.

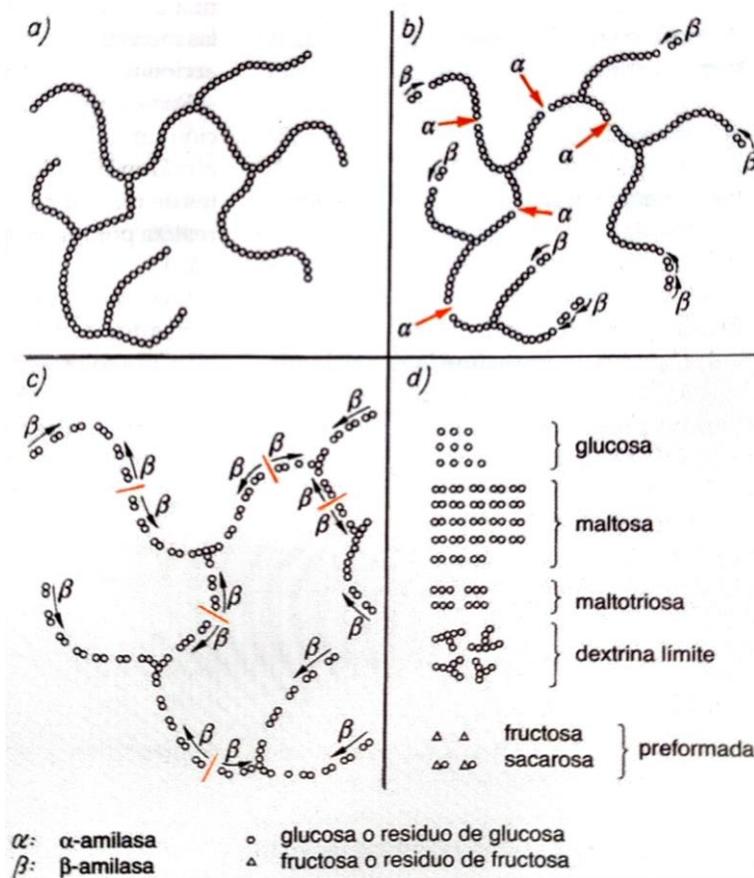


Figura 2.3 Degradación de almidón durante la maceración. Wolfgang Kunze, 2006

Al finalizar todas las fases de la degradación del almidón, los productos que serán asimilados por la levadura son:

- Dextrinas: no son fermentables.
- Maltotriosa: fermenta, pero cuando es consumida toda la maltosa.
- Maltosa: es el principal azúcar de la fermentación,
- Glucosa: el primer azúcar en fermentar.

La manera más sencilla para comprobar la ausencia del almidón en la masa es con un test con solución de yodo. Consiste en poner en contacto una gota del mosto con otra de yodo y dependiendo del color resultante de la mezcla, se sabe si hay presencia de almidón.

- La degradación de  $\beta$ -glucano:

Los  $\beta$ -glucanos son moléculas de alto peso molecular que se encuentran en la malta de cebada. Estas causan dificultades en la filtración del mosto, debido a que provocan un aumento de la viscosidad de la masa por la formación de geles. Durante el engrudamiento se desintegra la estructura de los granos de almidón y se liberan filamentos finos que contienen  $\beta$ -glucano. Cuando la temperatura se encuentra entre 40 y 45°C y se deja reposar la masa, la mayor parte del  $\beta$ -glucano se degrada a  $\beta$ -glucano soluble, evitando así la formación de geles.

Sin embargo, durante el cocimiento, el mosto alcanza temperaturas por encima de 70 a 80°C, formándose  $\beta$ -glucano activado térmicamente, que se comporta de manera muy diferente si se le somete a esfuerzos cortantes o agitaciones, pudiendo aparecer geles que dificulten la filtración, acción que se estudiará detalladamente más adelante.

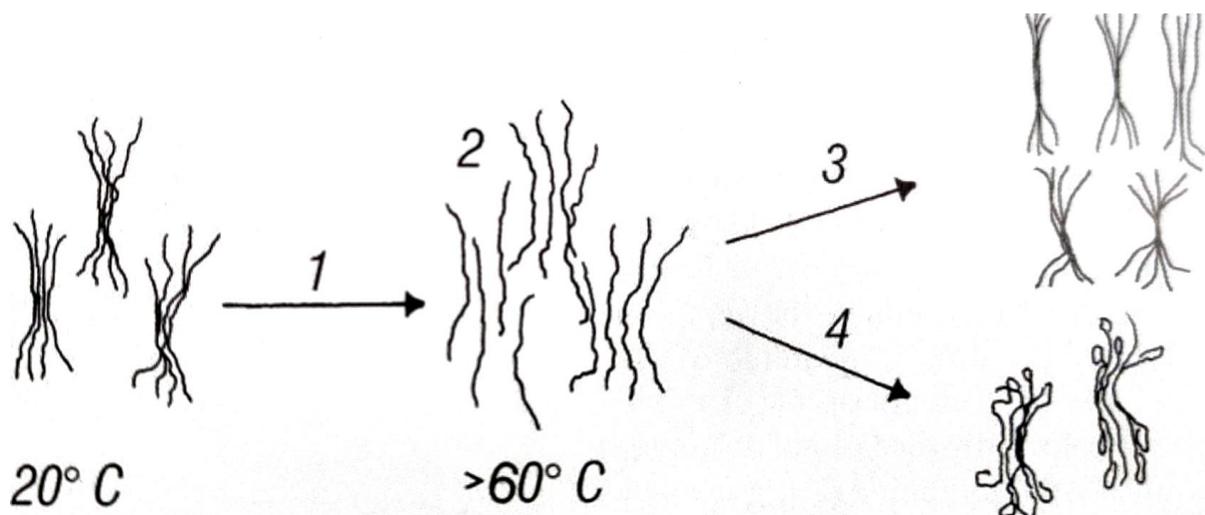


Figura 2.4: Cambios en la estructura del  $\beta$ -glucano. Wolfgang Kunze, 2006

Ruptura de los puentes de hidrógeno, (2)  $\beta$ -glucano activado térmicamente, (3) fuerzas de corte, (4) no hay fuerzas de corte, Wolfgang Kunze, Primera edición en español, 2006

La maceración comienza con la mezcla de molienda y agua, siendo la proporción variable, dependiendo de cómo se quiera la concentración del primer mosto. Para cervezas más claras se elige, por lo general, una cantidad de 3 a 4 hl de agua por cada 100 kg de molienda, consiguiendo reacciones enzimáticas más rápidas, mientras que para cervezas más oscuras se eligen proporciones de 0,7 a 0,8 hl por

cada 100 kg de molienda. La mezcla debe realizarse de tal forma que no se formen grumos.

También es muy importante el valor del pH de la mezcla para las reacciones enzimáticas. Para una mejor degradación de moléculas de mayor peso molecular y una reducción de viscosidad, el pH deberá encontrarse entre 5,6 a 5,5.

La maceración consiste en incrementar la temperatura de la mezcla hasta alcanzar temperaturas óptimas en las que las enzimas puedan actuar, dejando reposar la temperatura durante un tiempo determinado para que trabajen. Las temperaturas óptimas son:

- 45-50°C reposo proteico y  $\beta$ -glucano
- 62-65°C reposo de producción de maltosa
- 70-75°C reposo de sacarificación
- 75-78°C reposo de finalización de maceración

Según la forma de incrementar la temperatura existen dos tipos de proceso de maceración:

- Procesos de infusión. Son los procesos más sencillos. Toda la mezcla es calentada respetando los periodos de reposo, sin llegar a ebullición de la masa en ningún momento. Todo el proceso tiene lugar en una misma caldera equipada con sistemas de calefacción.

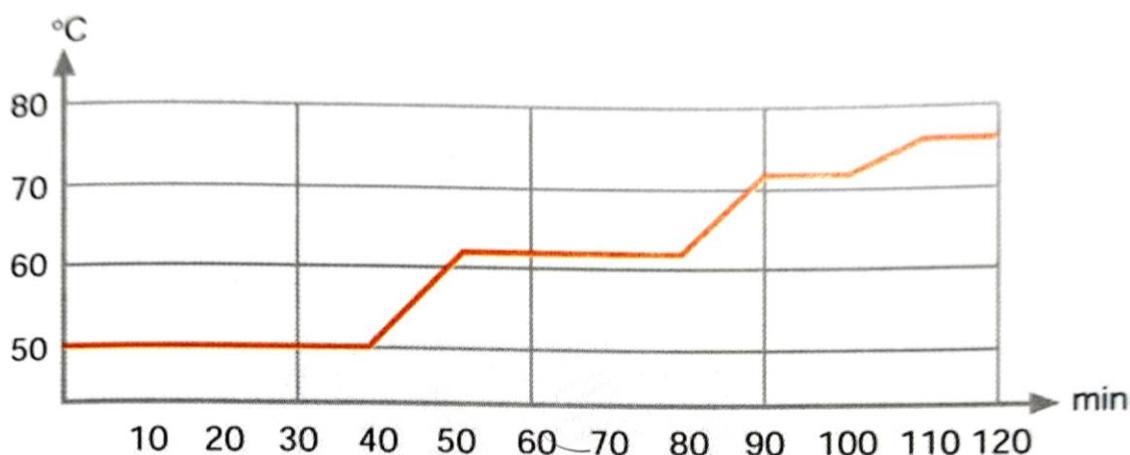


Figura 2.5 Proceso de infusión mezcla a 50°C. Wolfgang Kunze, 2006

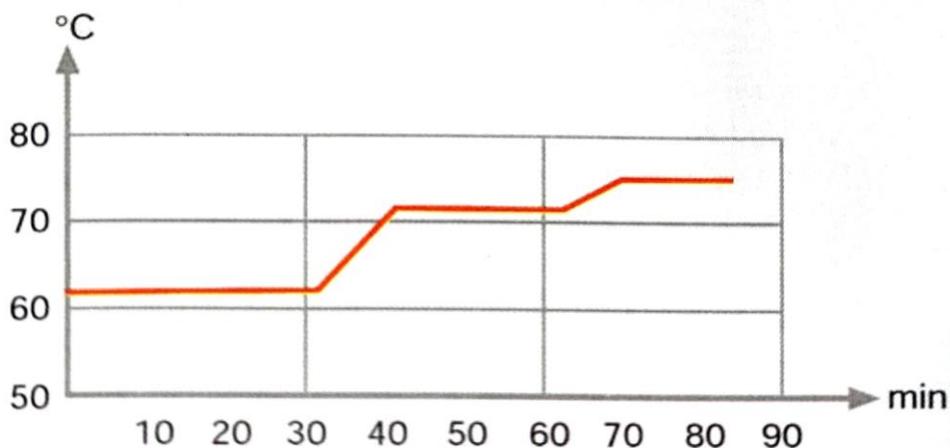


Figura 2.6 Proceso de infusión mezcla a 62°C. Wolfgang Kunze, 2006

- Procesos de decocción. En este proceso se extrae una parte de la masa y se la cuece hasta ebullición. Luego se bombea de retorno a la mezcla principal incrementando la temperatura. Dependiendo del número de veces que se repita este proceso, se distinguen entre proceso de uno, dos y tres temple.

**PROCESO DE DECOCCION DOS TEMPLES**

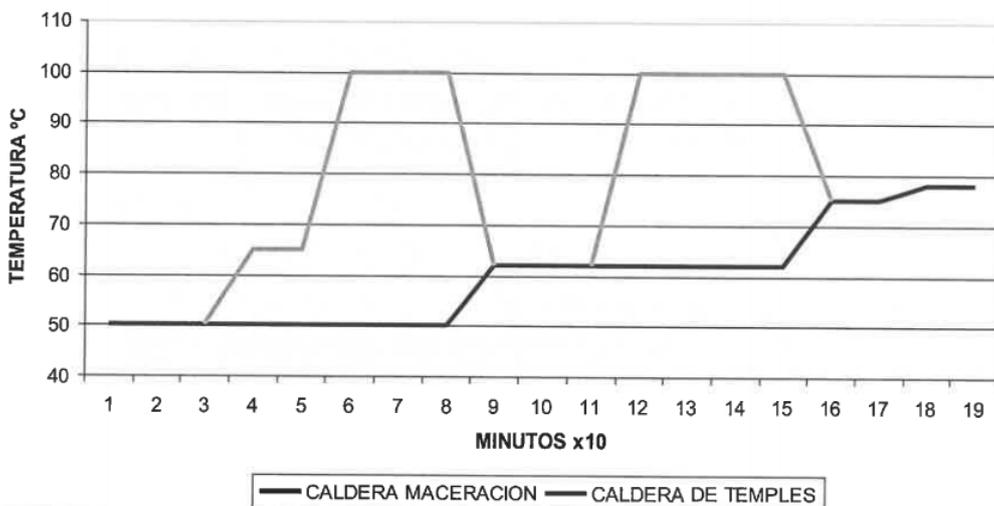


Figura 2.7 Proceso de decocción. Wolfgang Kunze, 2006

El almidón requerido para conseguir el azúcar no solo puede obtenerse de la malta, sino que está presente en todos los cereales. Por eso, dependiendo de la receta del fabricante, a la mezcla se le pueden añadir otro tipo de cereales como arroz, maíz y trigo en forma de adjuntos. Estos se tratan a unas determinadas temperaturas en una caldera diferente, llamada caldera de adjuntos, y se añaden posteriormente a la caldera de malta.

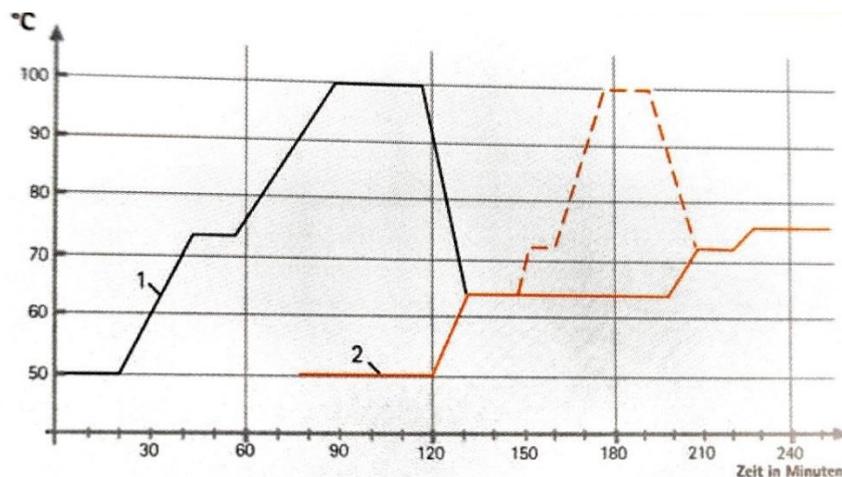


Figura 2.8 Maceración con adjunto (1) Caldera de adjuntos, (2) caldera de malta. Wolfgang Kunze, 2006

Una vez finalizada la maceración se obtiene el extracto, cuya composición será variable dependiendo de los objetivos marcados para la cerveza final que se desee fabricar. La composición promedio de los azúcares en un mosto de 11-12% de extracto es la siguiente:

- Maltosa 65,5%
- Maltotriosa 17,5%
- Sacarosa 5%
- Glucosa y fructosa 12%

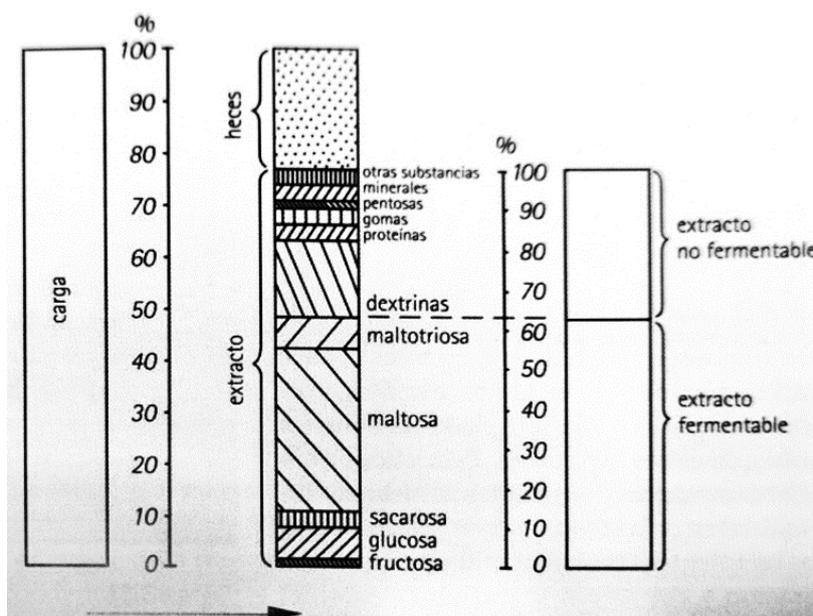


Figura 2.9 Composición del extracto. Wolfgang Kunze, 2006

### 2.2.3 Filtración

El objetivo del proceso de filtración es separar el extracto en dos partes bien diferenciadas, la parte acuosa compuesta por sustancias solubles que se llama mosto, y la parte insoluble llamada bagazo, en la que se encuentran las cáscaras y otras sustancias no disueltas. Este proceso se realiza en dos fases, el primer mosto en el que se obtiene la parte principal, un mosto denso, y el lavado del bagazo (denominado "sparging"), que permite recuperar el extracto soluble embebido en el bagazo haciendo pasar agua caliente (agua de lavado), y puede suponer aproximadamente un 20% del mosto final.

Existen dos tipos de sistemas de filtración, y en ambos casos es el propio bagazo quién actúa como lecho filtrante.

- Cuba filtro

Es el sistema de filtración más antiguo. El equipo consiste en un recipiente de forma cilíndrica con una cúpula en forma de casquete esférico o cónico provista de una chimenea para la evacuación de vahos, y un doble fondo ranurado en el que se deposita el bagazo. El material de construcción de la cuba es acero al cromo-níquel, y está aislada térmicamente por todos sus lados para evitar que se enfríe el mosto aumentando su viscosidad.

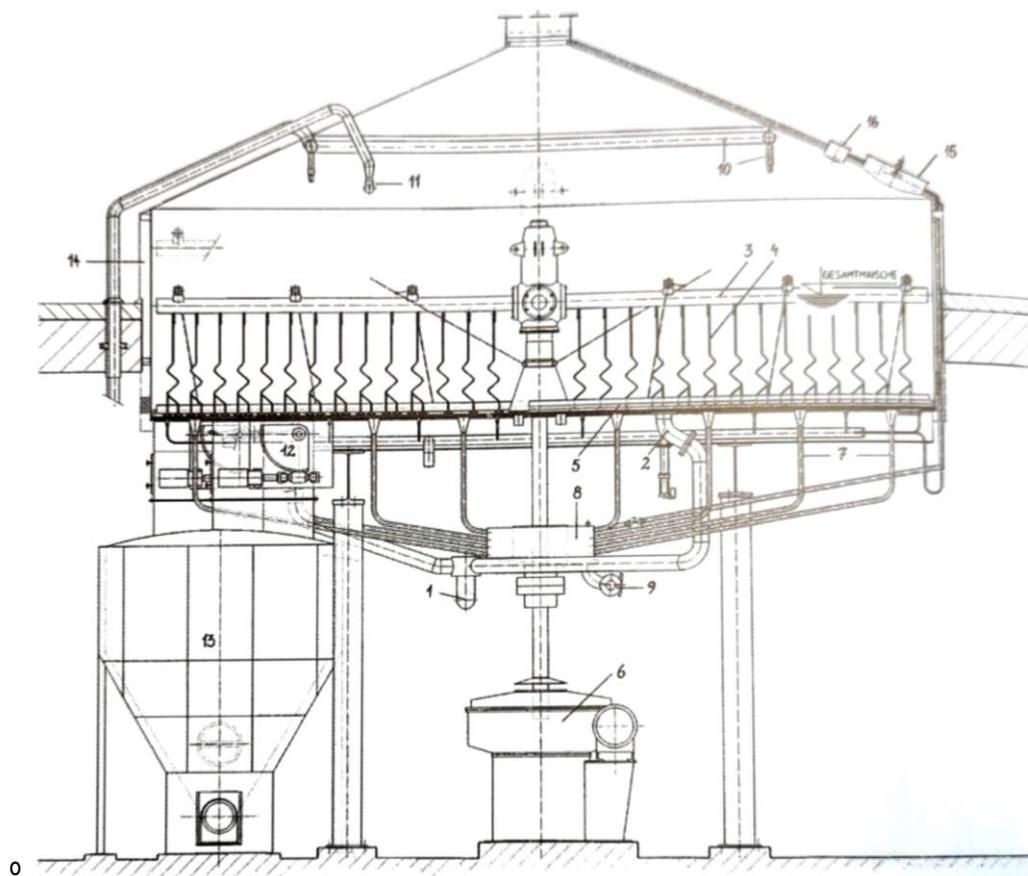


Figura 2.10 Cuba filtro. (1) tubería de suministro de masa, (2) válvula de entrada de masa, (3) dispositivo de rastrillo o unidad mullidora, (4) cuchilla, (5) rastrillo de evacuación de bagazo, en posición baja, (6) accionamiento y mecanismo elevador para dispositivo de rastrillo, (7) tubos de descarga, (8) recipiente colector anular, (9) descarga de mosto a la bomba de mosto, (10) agua de lavado, (11) cabezal rociador CIP, (12) válvula de bagazo, (13) tolva de bagazo, (14) aislación, (15) mirilla con acceso, (16) iluminación. Wolfgang Kunze, 2006

El proceso comienza introduciendo agua caliente (80°C) en la parte superior entre el fondo y el doble fondo, para calentar la cuba e impedir el enfriamiento del extracto, a la vez que se desaloja el aire para evitar bolsas que impidan la filtración.

A continuación, la masa es alimentada por debajo, para mantener la absorción de oxígeno lo más baja posible, a la vez que se pone en funcionamiento el mullidor que distribuye la mezcla uniformemente y constituye un lecho de filtración.

Al finalizar el bombeo se espera a que el bagazo forme el lecho y una capa de mosto se acumule encima. Este proceso se denomina reposo de filtración y el tiempo suele variar entre 5 y 10 minutos. Entre el fondo de la cuba y el falso fondo se acumula primero una masa de fondo que es retornada por bombeo junto con el primer mosto, ya que siempre está turbio. Una vez el mosto esté claro, comienza la filtración del

primer mosto. Este fluye a través del bagazo, el cual pone resistencia y así es filtrado. Esta filtración del primer mosto finaliza cuando queda visible el bagazo. En este momento comienza el lavado o sparging, añadiendo agua de riego a la cuba desde arriba, desplazando el mosto retenido en el bagazo de arriba hacia abajo, extrayendo la máxima cantidad posible de azúcar del bagazo. Este proceso se suele repetir entre dos y tres veces.

- Filtro prensa

El filtro prensa es el otro sistema de filtración más extendido. Se compone esencialmente de una serie de placas homogéneas de polipropileno alternadas, entre las cuales se deposita la masa, fluyendo el mosto por las telas filtrantes de las placas.

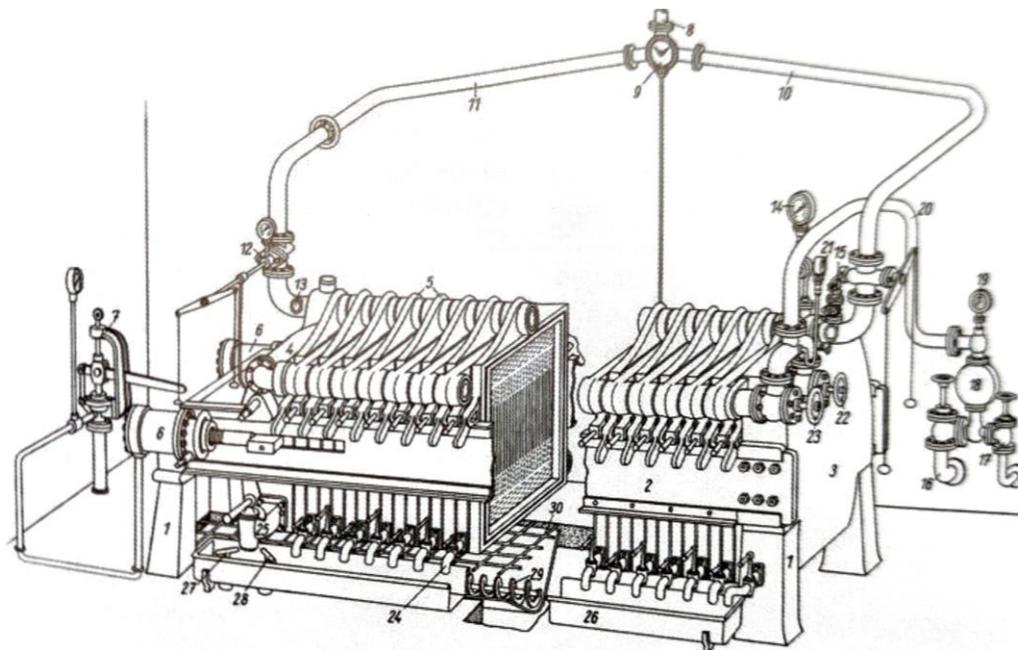


Figura 2.11 Filtro prensa. Wolfgang Kunze, 2006

La masa se introduce en los huecos por canales situados por encima y debajo de las placas, teniendo acceso el canal a cada una de las placas y llevando así la masa a todos los huecos vacíos. Las placas llevan a en uno o ambos lados telas filtrantes de material sintético que sirven de soporte del bagazo y a través de las cuales pasa el mosto. El proceso comienza introduciendo la masa en cada placa por el canal inferior, abandonando el aire por el canal superior. De esta forma fluye el primer mosto a través de la tela filtrante y es descargado por unos canales laterales. Para sacar la máxima cantidad posible de mosto del bagazo retenido se introduce agua en todas

las placas. El agua pasa por todo el bagazo extrayendo los azúcares restantes. Una vez finalizado todo el proceso puede inyectarse aire comprimido a través del canal superior secando todo el bagazo para poder abrir las cámaras, y que caiga a una tolva situada en la parte inferior del filtro.

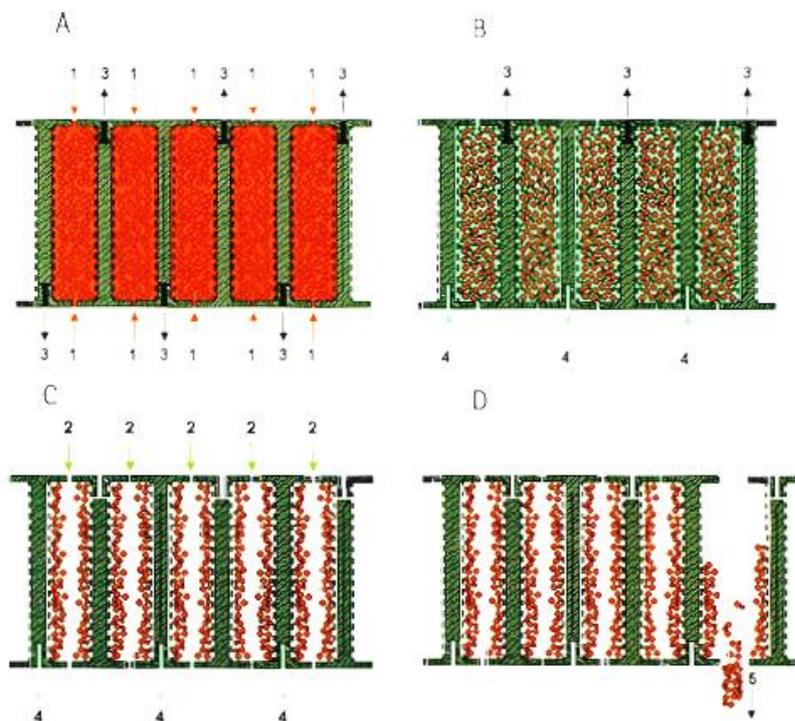


Figura 2.12 Secuencia de operación del filtro prensa. (A) llenado y descarga del primer mosto, (B) riego, (C) secado a presión, (D) evacuación de bagazo. 1-Masa, 2-Aire comprimido, 3-Mosto, 4-Agua de riego, 5-Bagazo. Wolfgang Kunze, 2006

Todo el mosto filtrado se dirige a la caldera de ebullición. En ocasiones y en función del número de cocimientos que se realicen al día puede ocurrir que el mosto pase primeramente a un tanque de espera mientras se vacía a caldera de ebullición.

### 2.2.4 Ebullición

Una vez todo el mosto está filtrado, pasa a la caldera de ebullición. En este punto se añade el lúpulo al mosto, y durante la ebullición este se disolverá y le conferirá el característico amargo a la cerveza final.

El proceso de ebullición suele durar unos 50 minutos, es por eso que la caldera de ebullición tiene que estar equipada con un dispositivo de calentamiento potente. Esto se suele conseguir con un sistema de calentamiento por vapor, que es el más extendido, aunque existen muchos sistemas. El vapor ingresa con una presión de 2 a 3 bar a 140°C en la camisa de vapor que cubre el fondo de la caldera, y entrega su calor de evaporación al mosto.

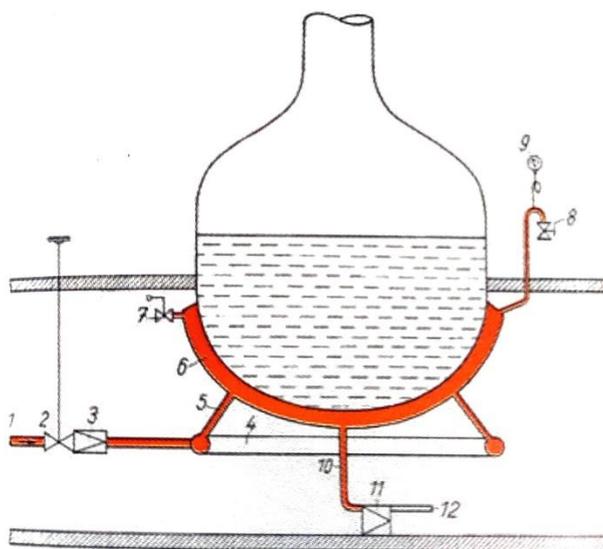


Figura 2.13 Caldera de ebullición con sistema de calentamiento por vapor. Wolfgang Kunze, 2006

La chimenea de la caldera tiene gran importancia, ya que permite la fácil evacuación de vapores formados durante la ebullición del mosto. Estos vapores suelen ser aprovechados por sistemas de recuperación de energía.

Durante el proceso de ebullición, los principales cambios que se producen en el mosto son:

- Formación y precipitación de compuestos formados por proteínas y polifenoles.
- Evaporación del agua.
- Esterilización del mosto.
- Destrucción de todas las enzimas.
- Aumento de la carga térmica del mosto.
- Reducción del pH del mosto.
- Formación de sustancias reductoras.
- Evaporación de sustancias aromáticas indeseadas.
- Disolución y transformación de componentes del lúpulo.

La adición del lúpulo dependerá de la receta, pero en general se realiza en tres ocasiones, una pequeña al principio antes de comenzar la ebullición para evitar la formación de fuertes espumas, una segunda al comenzar la ebullición añadiendo la mayor parte del lúpulo, y una tercera dosis más pequeña al casi terminar la cocción.

### 2.2.5 Clarificación

Durante la ebullición del mosto se forman partículas de gran tamaño que son más pesadas que el mosto. Estas forman el Turbio grueso o Turbio caliente, y debe ser extraído de la mezcla ya que es perjudicial para la calidad de la cerveza. La cantidad del turbio grueso es variable, pero suele ser aproximadamente de 6000 a 8000 mg/l, y debe ser reducida a menos de 100 mg/l, siendo este el objetivo del proceso de clarificación.

Para conseguirlo se emplea un recipiente vertical cilíndrico llamado Whirlpool, en el cual el mosto es introducido tangencialmente por bombeo. El principio físico del Whirlpool se basa en que las partículas sólidas en un líquido en rotación se desplazan desde la pared exterior hacia el centro al reducir la rotación. Al estar en rotación las partículas sólidas son desplazadas a la pared exterior debido a la aceleración centrífuga, mientras que la superficie líquida forma un paraboloides de rotación. Cuando acaba el bombeo, el rozamiento del líquido con las pared exterior y el fondo forma una recirculación dentro del recipiente, desplazando las partículas que antes estaban en el exterior hacia el centro.

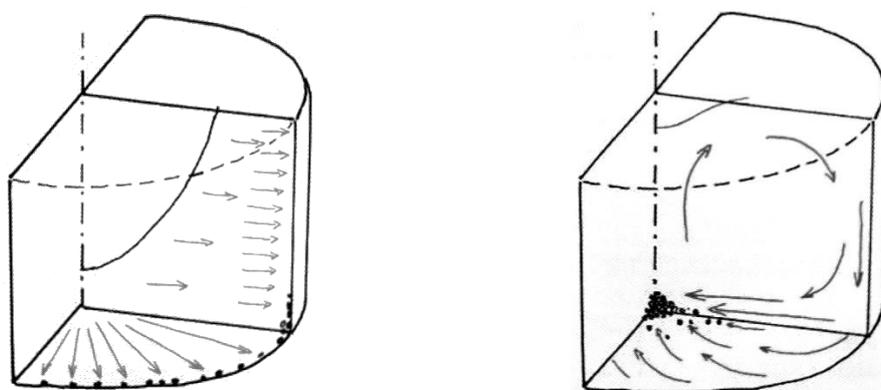


Figura 2.14 Corrientes y fuerzas en el Whirlpool. Wolfgang Kunze, 2006

Para conseguir esto el Whirlpool está equipado con un fondo plano con una pendiente del 1% hacia un extremo, para facilitar el drenaje final del turbio.

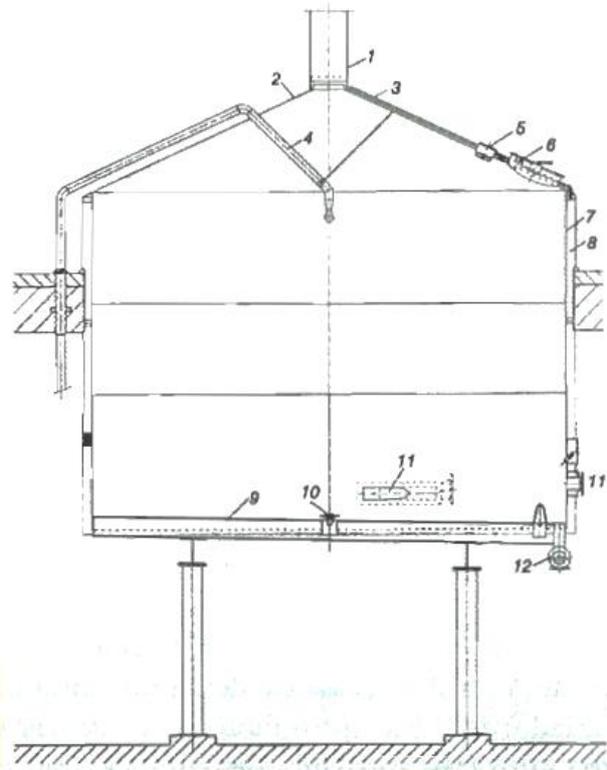


Figura 2.15 Whirlpool.

(1) extracción de vahos, (2) campana de extracción, (3) descarga de agua condensada, (4) limpieza CIP, (5) iluminación, (6) mirilla con entrada, (7) pared lateral, (8) aislación, (9) fondo con pendiente, (10) tobera de fondo para limpieza, (11) entrada tangencial, (12) salida.  
Wolfgang Kunze, 2006

### 2.2.6 Enfriado del mosto

El mosto sale de Whirlpool a elevada temperatura, sin embargo, dado que la levadura sólo puede fermentar a bajas temperaturas, el mosto se debe enfriar lo más rápidamente posible hasta una temperatura de unos 5 a 10°C. Además, para tener una fermentación más rápida, se le debe suministrar aire a la levadura, y este se introduce una vez el mosto esté frío, ya que la solubilidad del oxígeno aumenta con la disminución de la temperatura.

Cuando la temperatura desciende por debajo de los 60°C el mosto se vuelve a enturbiar, debido a la formación de pequeñas partículas de proteína y taninos principalmente, de aproximadamente 0,5 µm de diámetro. Por ello, se las denomina turbio fino o turbio frío. La extracción de este turbio es un problema que se intenta solventar de diferentes maneras. Sin embargo, no se debe extraer en gran medida ya que resultaría en la pérdida de sabor de la cerveza.

El enfriamiento del mosto se realiza en la actualidad casi exclusivamente con intercambiadores de calor de placas. Estos constan de una gran cantidad de finas placas de cromo-níquel, en las que por uno de sus lados fluye el mosto, y por el otro agua de refrigeración a contracorriente.

Una vez se obtenga el mosto enfriado, este se lleva a los tanques de fermentación, donde se junta con la levadura. Para la transformación del mosto en cerveza, los azúcares contenidos en el mosto deben ser fermentados, por las enzimas de la levadura, a etanol y dióxido de carbono.

### **3 FILTRACIÓN DEL MOSTO**

El proceso de filtración del mosto ocurre en la sala de cocción una vez se haya macerado la mezcla, con el fin de separar el mosto del bagazo. Como ya se ha explicado, existen dos principales técnicas para llevar a cabo este proceso, la más clásica con la cuba filtro, y otra cada vez más extendida, con el filtro prensa.

Esta última permite filtrar una mayor cantidad de mosto con el mismo tiempo, y por eso es la opción más extendida actualmente a la hora de construir una nueva sala de cocción. Sin embargo, aunque el filtro prensa trabaje con mayor velocidad, el tiempo de este proceso puede variar, entre otros factores, debido a la acción de las fuerzas de corte a las que es sometida la mezcla antes de llegar al filtro. Este tiempo de operación tiene gran importancia, ya que de él depende la capacidad de producción de la planta cervecera.

#### **3.1 DIAGRAMA DE OCUPACIÓN**

En una planta de fabricación de cerveza, todo el proceso desde que entra la molienda hasta que se consigue el mosto preparado para entrar en los tanques de fermentación se realiza en la sala de cocción. Esta sala es el corazón de la fábrica, y de su capacidad y rendimiento depende tanto el diseño de todos los demás procesos de la fábrica, como la capacidad de producción total de la planta. En esta sala se realizan los procesos de maceración, filtración, ebullición y clarificación, y a todo el conjunto se le denomina cocimiento. La producción de una sala de cocción vendrá dada por dos valores; el tamaño de la sala de cocción, es decir del lote que puede producir y por el número de lotes o cocimientos que puede realizar al día. Es importante por tanto conocer los tiempos de ocupación de cada elemento que forma la sala de cocción identificando cuales pueden ser los cuellos de botella que limiten el número de cocimientos por día. Por ejemplo, supongamos una receta de cebada con arroz como adjunto, y una sala equipada con un premacerador que se encarga de hidratar la malta antes de entrar en la caldera para facilitar la mezcla con el agua, una caldera de adjuntos, una caldera de maceración, un filtro prensa, un tanque espera, un

enfriador y un Whirlpool, y el cuello de botella se encuentra en el macerador. El proceso de maceración se desglosa a su vez en el llenado de la caldera, la maceración de la mezcla y el envío al tanque de espera. En total el proceso dura 200 minutos, así que como máximo el número de cocimientos diarios será:

$$n^{\circ} \text{ cocimientos} = \frac{\text{Capacidad diaria}}{\text{Tiempo en el cuello de botella}} = \frac{1440 \text{ min}}{200 \text{ min}} = 7.2 \text{ cocimientos}$$

Para aumentar el número de lotes al día tendrá que estudiarse diferentes soluciones. El tiempo del cuello de botella no siempre se puede reducir, ya que la velocidad de la mezcla durante el envío no se puede aumentar debido a que puede alterar la calidad de la mezcla debido a las fuerzas de corte, ni se puede reducir el tiempo de la maceración ya que se cambia la curva de temperatura de la receta, etc. Una posible solución sería añadir otra caldera de maceración siempre y cuando haya disponibilidad de espacio en la sala. Eligiendo esta solución, el diagrama de ocupación para un cocimiento de la nueva sala será el siguiente:

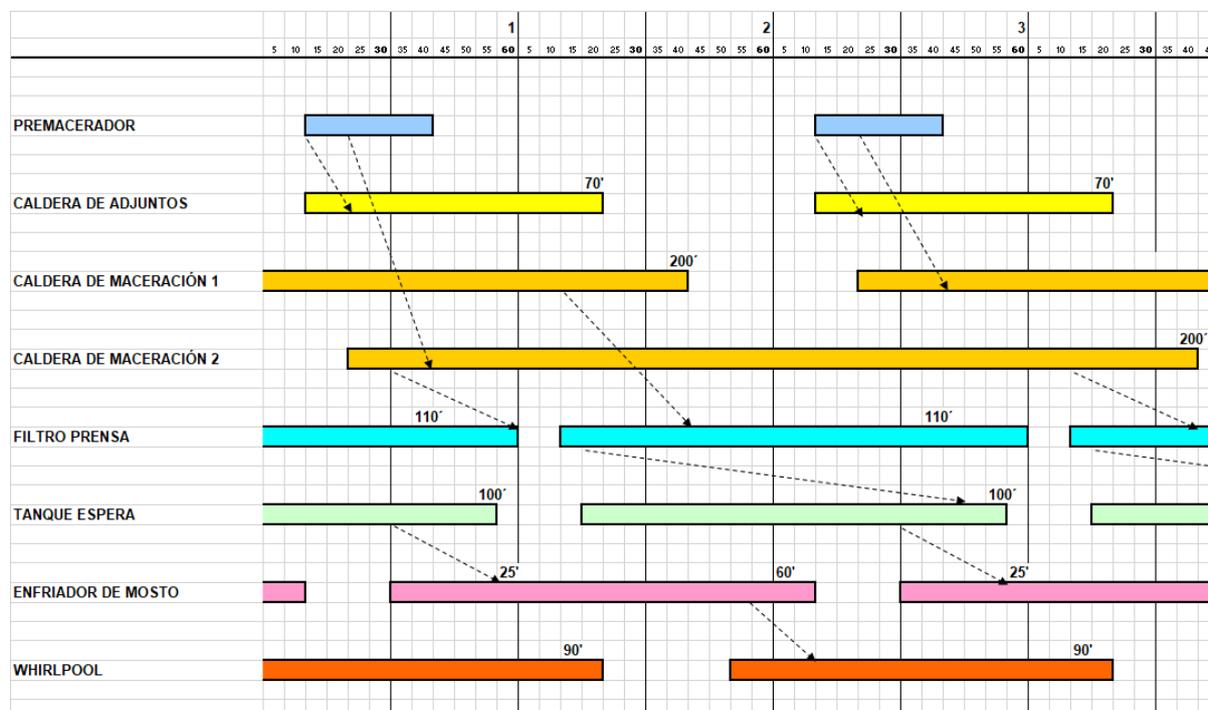


Figura 3.1 Diagrama de ocupación 12 cocimientos diarios. Elaboración Talleres Landaluce.

Cada lote comienza con el premacerador y termina en el Whirlpool. Como se puede observar, la nueva sala puede llegar a realizar 12 cocimientos al día en vez de los 7 que se podían realizar con una sola caldera de maceración.

Veamos qué pasa si intentamos fabricar 13 cocimientos al día.

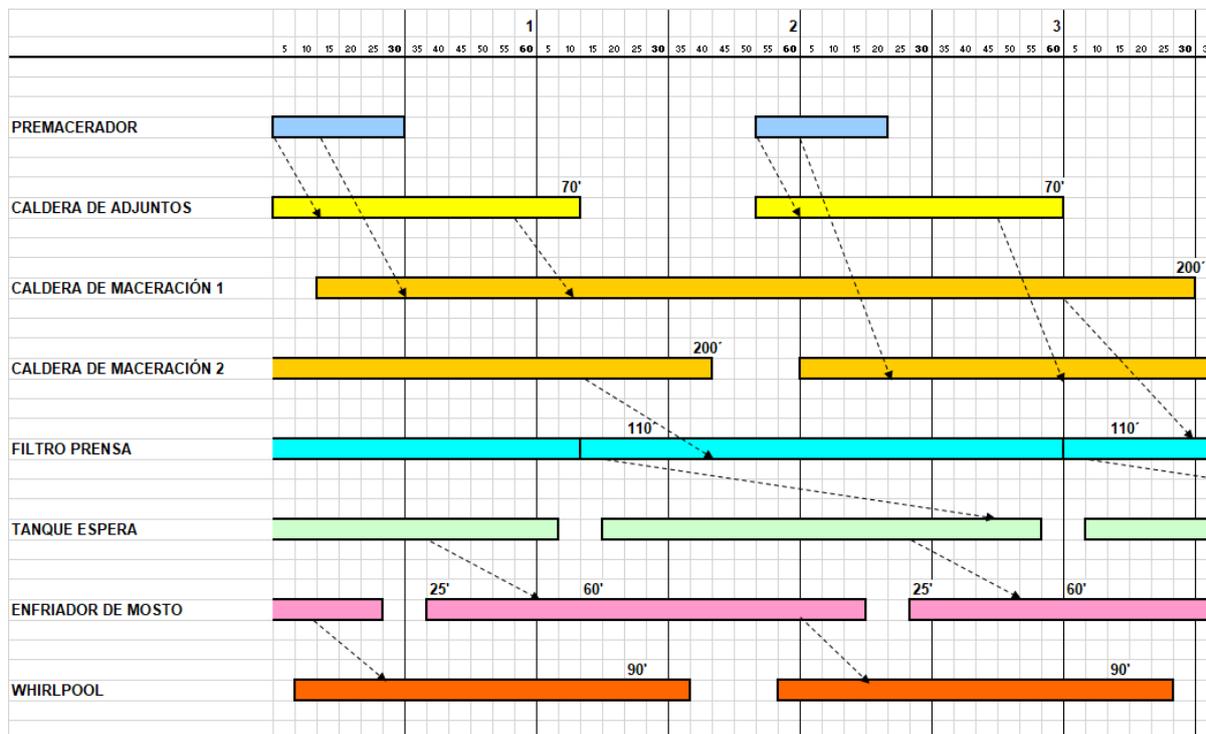


Figura 3.2 Diagrama de ocupación 13 cocimientos diarios. Elaboración Talleres Landaluce.

Como se ve en el diagrama, sería posible. Pero a partir de ese número de lotes el cuello de botella pasa a ser el filtro prensa y no sería ya posible realizar más de esos 13 cocimientos por día.

Con objeto de poder acortar ese tiempo de ocupación del filtro es importante conocer todos los factores que afectan a la filtración y en concreto el factor de filtrabilidad del que hablaremos más adelante y estudiar la forma de aumentar la capacidad de producción de la planta sin tener que llegar a ampliar la sala de cocción

### 3.2 EFECTOS DE LAS FUERZAS DE CORTE EN LA FILTRACIÓN

Durante la maceración, la temperatura de la mezcla se puede elevar hasta los 70 y 80°C, rango en el cual las moléculas de  $\beta$ -glucano ya disueltas se vuelven a activar térmicamente. Una vez formadas, estas se comportan de manera muy diferente dependiendo de si la mezcla es sometida a esfuerzos cortantes o de cizalladura, ya que esto provoca que se formen puentes de hidrógeno entre las hebras de glucano dentro de las moléculas, lo que conlleva a la aparición de geles.

La formación de estos geles tiene gran repercusión en la viscosidad de la mezcla, lo que dificultará la filtración.



Figura 3.3 Influencia de las fuerzas de corte en la viscosidad. Wolfgang Kunze, 2006

La figura muestra el aumento de viscosidad de una mezcla a 65°C recorriendo un circuito en el que experimenta fuerzas de corte. Se puede apreciar claramente el aumento de la viscosidad entre la primera muestra, la cual no ha sido sometida a fuerzas de corte, y la última, en la que ha tenido gran influencia, con un promedio de 0,928 mPa·s.

Estos cambios en las estructuras de las moléculas al ser sometidas a esfuerzos cortantes son provocados por las deformaciones que experimentan en las zonas con capas límite turbulentas. Estas capas límite turbulentas se forman en las zonas donde se manifiestan grandes cambios de presión, como en tuberías con codos o bombas, y provocan que la velocidad de la mezcla no sea uniforme en toda la sección.

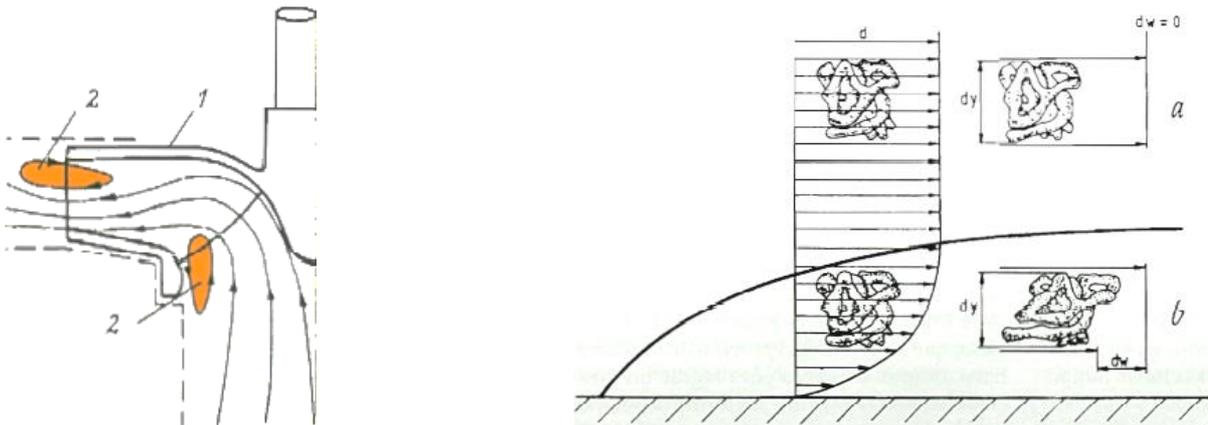


Figura 3.4 Formación de fuerzas de corte y deformación de pequeños cuerpos en la capa límite.

Wolfgang Kunze, 2006

### 3.3 LEY DE DARCY

El principio de funcionamiento de los filtros prensa está basado en las ecuaciones de filtración que se desarrollan a partir de la ecuación de Darcy, que describe el comportamiento de un líquido a través de un medio poroso.

$$Q = \frac{dV}{dt} = \frac{P \cdot A}{\mu \cdot R_f} \quad (3.1)$$

$Q$  = Caudal ( $m^3/s$ )

$V$  = Volumen ( $m^3$ )

$t$  = Tiempo ( $s$ )

$P$  = Presión ( $Pa$ )

$A$  = Área ( $m^2$ )

$\mu$  = Viscosidad del filtrado ( $Pa \cdot s$ )

$R_f$  = Resistencia ( $m^{-1}$ )

La resistencia del sistema  $R_f$  está compuesta a su vez por dos factores, la resistencia de la tela filtrante  $R_m$  y la resistencia de la torta  $R_c$ , por lo tanto:

$$Q = \frac{dV}{dt} = \frac{P \cdot A}{\mu \cdot (R_m + R_c)} \quad (3.2)$$

Y por definición, la resistencia de la torta  $R_c$  es proporcional a una resistencia específica de la mezcla, en la que influyen parámetros como la granulometría de la molienda, la concentración de malta seca sobre el volumen de filtrado, y al volumen de la torta, e inversamente proporcional a la superficie del filtro. A su vez, para simplificar los cálculos, se define la resistencia de la tela filtrante  $R_m$  en función de los parámetros de la torta, pero con un volumen ficticio de filtro, que haga equivalente a la resistencia de la tela.

$$R_c = \frac{\alpha \cdot c \cdot V}{A} \quad R_m = \frac{\alpha \cdot c \cdot V_f}{A} \quad (3.3), (3.4)$$

$\alpha$  = Resistencia específica ( $m/kg$ )

$c$  = Concentración de malta seca ( $kg/m^3$ )

$V_f$  = Volumen ficticio de filtro ( $m^3$ )

Entonces, sustituyendo en (3.2)

$$\frac{dt}{dV} = \frac{\mu \cdot \alpha \cdot c \cdot V}{P \cdot A^2} + \frac{\mu \cdot \alpha \cdot c \cdot V_f}{P \cdot A^2} \quad (3.5)$$

Y si se integra (3.5) a presión constante y operando, se obtiene,

$$\frac{t}{V} = \frac{\mu \cdot \alpha \cdot c}{2 \cdot P \cdot A^2} V + \frac{\mu \cdot \alpha \cdot c \cdot V_f}{P \cdot A^2} \quad (3.6)$$

Que como se puede observar sigue una relación lineal y se puede simplificar definiendo la constante de Ruth K,

$$\frac{1}{K} = \frac{\mu \cdot \alpha \cdot c}{2 \cdot P \cdot A^2} \quad (4.6)$$

Obteniendo así la ecuación de la recta de Ruth,

$$\frac{t}{V} = \frac{2 \cdot V_f}{K} + \frac{V}{K} \quad (3.7)$$

Que se puede representar experimentalmente de manera sencilla midiendo el volumen de mosto filtrado a lo largo del tiempo de filtración.

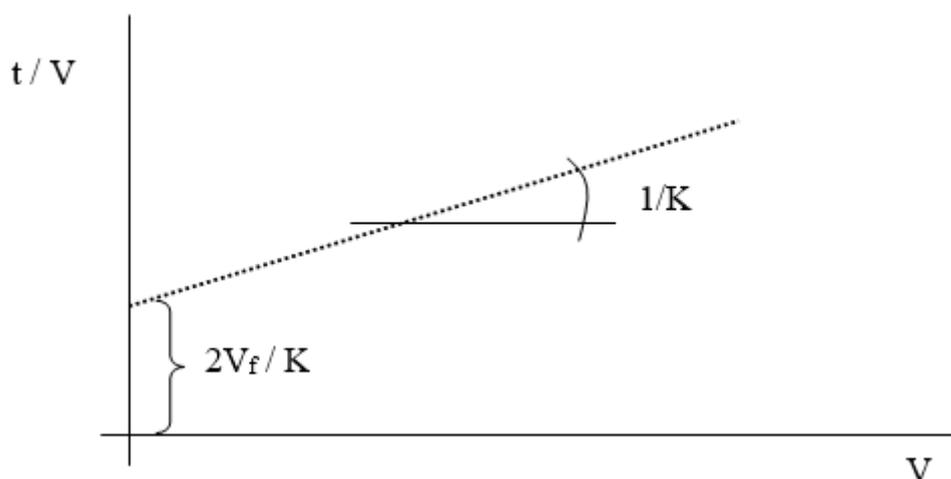


Figura 3.5 Recta de Ruth. Elaboración Talleres Landaluce

El valor de  $2 \cdot V_f / K$  que representa la resistencia de la tela  $R_m$  es muy pequeño en relación con la resistencia de la torta, por lo que de manera práctica se puede simplificar la ecuación de Ruth eliminando ese término, obteniendo

$$\frac{t}{V} = \frac{1}{K} V \quad (3.8)$$

### 3.4 COEFICIENTE DE FILTRACIÓN $F_k$

Sin embargo, el problema de la constante  $K$  es que tiene en cuenta la superficie del filtro, por lo tanto, no es práctico a la hora de comparar la recta en filtros de dimensiones diferentes. Por eso mismo, se define un nuevo coeficiente de filtración denominado  $F_k$ . Este coeficiente tiene la ventaja de ser independiente de las dimensiones del filtro empleado, y solo depende de las características de la torta.

$$F_k = \frac{2 \cdot A^2}{K} \quad F_k = \frac{\mu \cdot \alpha \cdot c}{P} \quad (3.9)$$

Obteniéndose así la ecuación de la recta de Ruth en función del coeficiente  $F_k$ .

$$\frac{t}{V} = F_k \frac{V_f}{A^2} + \frac{F_k}{2 \cdot A^2} V \quad (3.10)$$

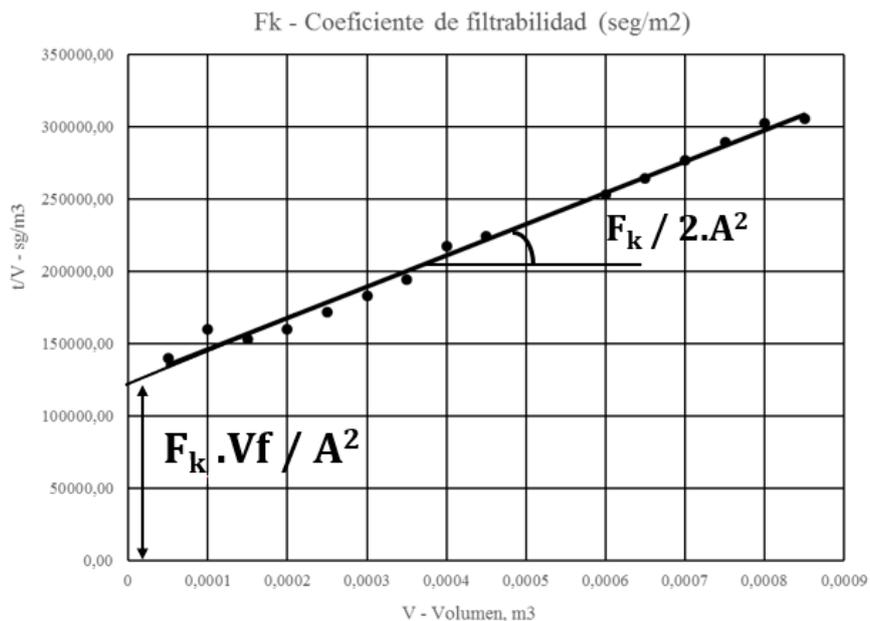


Figura 3.6 Recta de Ruth con parámetro  $F_k$ . Elaboración Talleres Landaluce

Esta relación resulta muy útil ya que permite obtener de manera experimental un parámetro que se puede emplear para comparar filtraciones con distintas condiciones, ya sea por la composición de la mezcla empleada, o los distintos medios a los que es sometida la mezcla (bombas, tuberías, agitaciones...), indicando un coeficiente  $F_k$  más bajo una mejor filtración.

Para calcular este coeficiente se filtra una muestra de la mezcla a estudiar a presión constante, tomando los valores del volumen del líquido filtrado y tiempo mientras dura el proceso de filtración. Una vez haya terminado se obtiene una recta, de cuya pendiente se calcula el coeficiente de filtrabilidad  $F_k$ . Esta muestra puede ser recogida de cualquier punto significativo entre la maceración y el filtro.

Unos valores estándar para  $F_k$  son:

|   |                                       |
|---|---------------------------------------|
| $F_k < 0,25 \cdot 10^6$                   | Laboratorio                           |
| $0,25 \cdot 10^6 < F_k < 0,30 \cdot 10^6$ | Óptimo                                |
| $0,30 \cdot 10^6 < F_k < 0,50 \cdot 10^6$ | Normal (excelente a nivel industrial) |
| $F_k > 0,50 \cdot 10^6$                   | Malo                                  |

## 4 PRUEBAS LABORATORIO

Se sabe que las fuerzas de corte tienen un efecto negativo en el desarrollo de la filtración del mosto. Para tener una manera de cuantificar este efecto, se usará la propiedad del coeficiente  $F_k$ , que es independiente del tamaño del filtro, permitiendo realizar pruebas con un equipo de menor tamaño y siendo los resultados igual de válidos para un filtro prensa de tamaño industrial.

Las pruebas consistirán en realizar varias filtraciones en una escala reducida, a partir de una maceración a la que se le ha sometido a distintas condiciones de fuerzas de corte, midiendo el coeficiente  $F_k$ , en distintos momentos y comparándolo con las demás situaciones y observando cómo cambia el  $F_k$  para cada una de ellas. Comparando estos incrementos de  $F_k$ , se cuantifica cuánto ha empeorado cada filtración del ensayo.

### 4.1 DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO

#### 4.1.1 Molino de martillos

Para poder moler los granos de malta y conseguir una molienda para macerar, se usa un molino eléctrico de martillos. Este molino incorpora un motor eléctrico de 1,8 kW de potencia máxima, que hará girar unas cuchillas en su interior llamadas martillos. Estas trituran el grano de malta que entra por la tolva de la parte superior, expulsando la molienda por la inferior.



*Figura 4.1 Molino de martillos. Elaboración propia.*

Para controlar la granulometría de la molienda, en la salida inferior se coloca una rejilla intercambiable, pudiendo elegir entre varios tamaños de huecos para obtener una molienda más o menos fina. En estas pruebas se ha elegido una con unos huecos de tamaño intermedio, permitiendo obtener unos trozos de grano lo suficientemente grandes como para poder crear una capa de lecho filtrante a la hora de llevar a cabo la filtración de la mezcla.

#### **4.1.2 Planchister**

Este equipo está compuesto por cinco marcos de tamices con superficie filtrante horizontal ordenada de forma superpuesta, y un fondo. Estos son sometidos a una vibración, distribuyendo así la molienda según su tamaño entre todos los tamices y el fondo, pudiendo realizar así un examen de su granulometría

Los marcos de los tamices se encuentran a una distancia moderada y en cada uno, unas bolas de goma que saltarán con la vibración de la máquina, evitando así el taponamiento de las telas de los tamices provocado por los trozos de grano de igual tamaño de los huecos.



Figura 4.2 Planchister. Elaboración propia.

El tamaño de los huecos de los cinco tamices es:

- 1200  $\mu\text{m}$
- 1000  $\mu\text{m}$
- 500  $\mu\text{m}$
- 250  $\mu\text{m}$
- 125  $\mu\text{m}$

Para calcular la granulometría de la molienda se divide el peso de grano que se queda en cada tamiz y el fondo, con el peso total de la muestra de molienda introducida en el planchister, calculando así el porcentaje de cada tamaño de grano de la molienda.

### 4.1.3 Macerador

El macerador consiste en una caldera de maceración, pero a una escala reducida. En ella se introduce el agua y la molienda, y se lleva a cabo una curva de temperatura que garantice que se llevan a cabo todas las transformaciones químicas de la mezcla

durante el proceso de maceración. Las partes principales son: la caldera, el sistema de calefacción, el agitador, y el sistema de restricciones por el que recirculará la mezcla para someterla a fuerzas cortantes.



*Figura 4.3 Macerador. Elaboración propia.*

La caldera es un recipiente cilíndrico de acero inoxidable, con una tapa en la que va sujeto el agitador. Está recubierto por varios sistemas de protección térmica por las temperaturas que alcanza, como una chapa separada para que no haya contacto directo con la caldera, y una camisa aislante térmica para proteger también los demás elementos. Para el sistema de calefacción se utiliza una paella alimentada con una bombona de propano, con la que se regula la temperatura de la caldera, que es controlada por un termopar en su interior conectado a un display en la parte exterior.

El agitador se encuentra fijado en la tapa superior y removerá la mezcla durante la maceración, garantizando la homogeneidad de la mezcla. Consiste en un eje en el que se encuentran dos palas en la parte inferior, y un pequeño motor eléctrico en la superior, que se encargará de hacer girar el eje con las palas



Figura 4.4 Placa del motor eléctrico del agitador. Elaboración propia.



Figura 4.5 Palas del agitador. Elaboración propia.

Para simular el paso de la mezcla una vez macerada por un sistema de tuberías, se hace recircular la mezcla desde la parte inferior de la caldera, a través de un circuito que incorpora una bomba y un sistema de tuberías con múltiples codos para obtener una pérdida de carga en el circuito. Esta se puede calcular gracias a dos manómetros, uno a la entrada de los codos y otro a la salida,

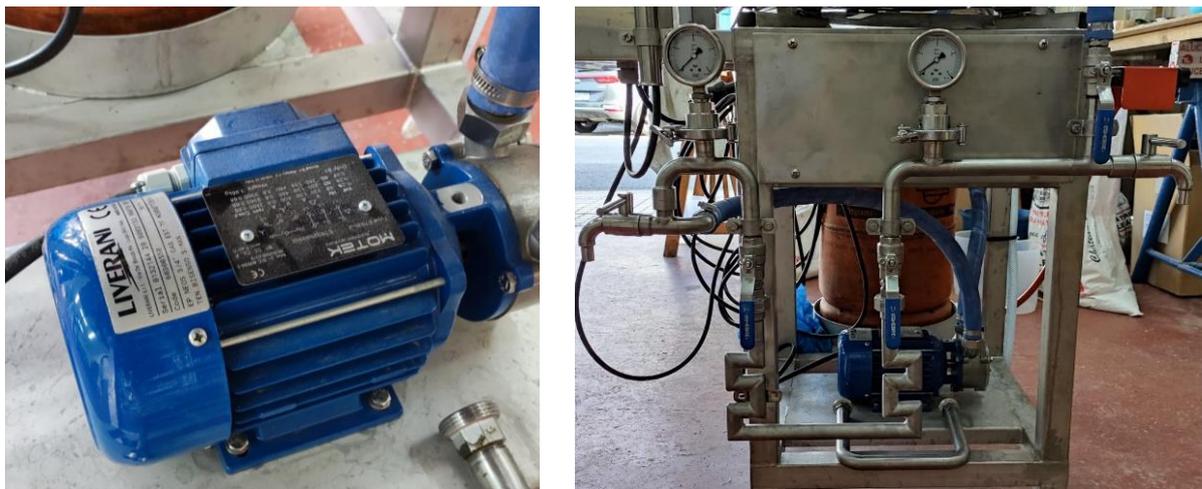


Figura 4.6 Circuito equivalente de tuberías. Elaboración propia.

Para el sistema de control de la bomba y el agitador se utilizan unos variadores de frecuencia, permitiendo controlar la velocidad del agitador y de la bomba desde un cuadro de mando, además de incorporar los sistemas de protección correspondientes.

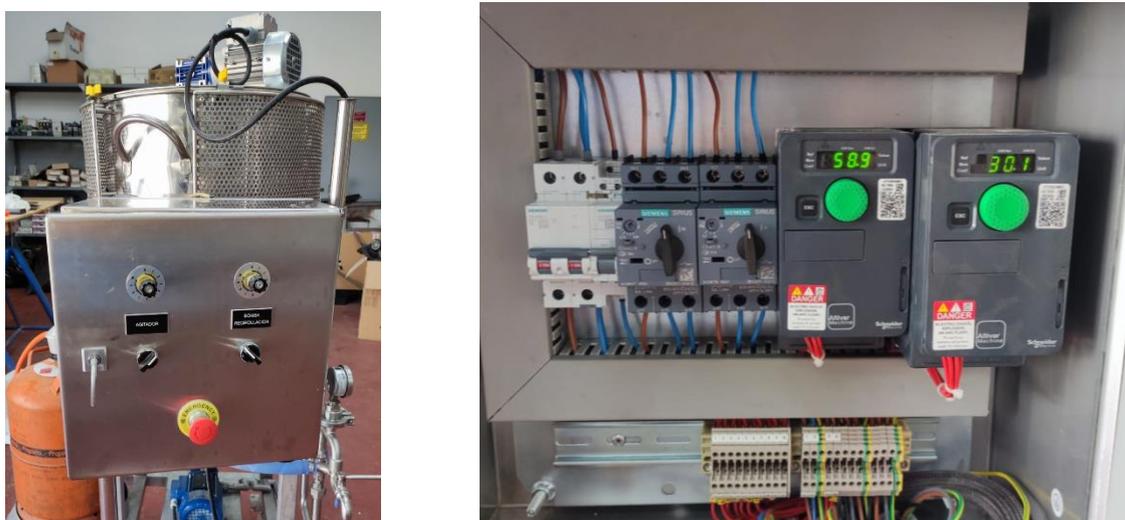


Figura 4.7 Sistema de control de la bomba y el agitador. Elaboración propia.

#### 4.1.4 Fk meter

El Fk meter será el equipo encargada de realizar el proceso de filtración, tomando los valores necesarios de volumen y tiempo para poder representar la recta de Ruth y calcular el valor de  $F_k$  con su pendiente. Los principales elementos de este equipo son:

- Recipiente del filtro con falso fondo.
- Sistema de presión con CO<sub>2</sub>.
- Soporte para medir el peso.
- Pantalla para control.
- Control de temperatura con baño termostático.



Figura 4.8 Fk meter. Elaboración propia.

La mezcla sobre la que se realizará el ensayo se deposita en un pequeño tanque que dispone de una pequeña camisa de calentamiento por la que circula agua caliente. Esta mezcla se somete a una curva de temperatura definidas y posteriormente aplicando una presión constante se filtra sobre un falso fondo al tiempo que se mide el volumen filtrado y el tiempo.

Todo el sistema es controlado a través de un panel PC desde donde se establecen los datos del ensayo, como la presión y temperatura de filtración, además de poder visualizar y guardar todos los resultados. En el panel se muestra tanto el estado actual del ensayo, como cualquier tipo de alerta que pudiera haber.

## **4.2 DESCRIPCIÓN DE LAS PRUEBAS**

Las pruebas consistirán en realizar maceraciones idénticas, pero con diferente condiciones en el circuito de recirculación para poder apreciar las consecuencias que tiene este a la hora de filtrar. Para que todas las pruebas partan de las mismas condiciones iniciales antes de pasar por el circuito de tuberías con codos, se debe seguir un mismo método de molienda y maceración. Se tomarán tres muestras para hacerlas pasar por el Fk meter en cada prueba. La primera nada más acabar la maceración para comprobar que parten de un valor de  $F_k$ , y una vez se verifique, se enciende la bomba para empezar a hacer pasar la mezcla por el circuito de tuberías. Las dos muestras restantes se harán pasar por el Fk meter pasado un tiempo desde que empezó a recircular, la primera a los 30 minutos y la segunda a los 70.

### **4.2.1 Molienda**

El primer paso para realizar la prueba es tener una molienda adecuada para macerar. Para ello, se pesan 8 kg de grano de malta y se trituran en el molino de martillo. Para garantizar la homogeneidad de la molienda, la malta se introduce en la tolva del molino con un flujo lento y constante, para que los martillos trituren todos los granos que entran y no quede ninguno entero.



*Figura 4.9 Malta antes y después de la molienda. Elaboración propia.*

Una vez obtenida la molienda, se reservan aproximadamente 200 gramos para hacerlos pasar por el planchister y obtener su granulometría. Cuando la máquina termina de separar los trozos de grano según su tamaño, se pesa el contenido de cada tamiz para saber el porcentaje de cada tamaño de grano y comprobar que todas las moliendas tienen una granulometría similar.

#### **4.2.2 Maceración**

De los 8 kg de molienda se cogerán 7 para hacer la maceración, utilizando una relación de hidratación 3:1, por lo que se empezarán a calentar 21 litros de agua en la caldera. La maceración comienza con un reposo a 65°C, por lo que se iniciará el empaste cuando el agua haya alcanzado 70°C. Para realizar el empaste se remueve la tapa de la caldera con el agitador, ya que hay que mezclar bien la molienda con el agua, debido a la formación de grumos al inicio del empaste. Para removerlos se utiliza una pala de manera manual para romper los grumos más grandes, ya que son perjudiciales para la maceración.



Figura 4.10 Proceso de eliminación de los grumos. Elaboración propia.

Una vez se haya mezclado la molienda con el agua, se vuelve a colocar el agitador y empieza a funcionar. La velocidad de agitación es muy importante, ya que tiene que ser lo suficientemente rápida como para mezclar bien durante la maceración, pero no tan grande como para tener una influencia significativa en la filtración, aumentando su  $F_k$ . Experimentalmente se sabe que a nivel industrial con palas más grandes y funcionando a mayor velocidad, estas agitan la mezcla creando esfuerzos cortantes empeorando la filtración. Sin embargo, a una escala tan reducida, se ha elegido una velocidad de 28,5 rpm, ajustando el controlador de frecuencia a 50 Hz, y con una velocidad máxima en el extremo de la pala de 0,633 m/s, comprobando que no tiene la velocidad suficiente como para empeorar el coeficiente  $F_k$  y así estudiar solo la influencia que tiene el circuito de tuberías.

Para la maceración se ha elegido una curva sencilla. Empieza cuando se enciende el agitador y se mantiene a 65°C durante una hora, comprobando constantemente la temperatura con el display de la caldera y regulando con la salida de gas para corregir. Una vez haya acabado el primer reposo, empieza la primera rampa de temperatura. Con una velocidad de aproximadamente 0,7°C/min, se eleva la temperatura hasta los 72°C, donde volverá a reposar 10 minutos, teniendo lugar la reacción de sacarificación, donde el almidón se transforma en azúcares. Al finalizar este reposo

se comprueba que la mezcla ha sacarificado correctamente con el test de yodo. El test de yodo consiste en mezclar unas gotas de la mezcla con algo de yodo. El color de la mezcla indicará si aún queda almidón por sacarificar, ya que la reacción del yodo con el almidón tiñe la mezcla con un color negro, por lo que significa que el reposo no ha sido suficiente y aún queda almidón. Si el test tiene un color amarillento como el color del yodo sin marcas negras, significa que en el reposo se ha sacarificado correctamente y no queda almidón,



Figura 4.11 Test de yodo. A la izquierda dos muestras de agua con molienda sin macerar, a la derecha muestra ya sacarificada. Elaboración propia.

Si el resultado del test de yodo es correcto, comienza la última rampa de la maceración, con una velocidad de  $0,4^{\circ}\text{C}/\text{min}$ , hasta llegar a los  $76^{\circ}\text{C}$ , temperatura con la que finaliza la maceración.

Gráficamente la curva de maceración es la siguiente:

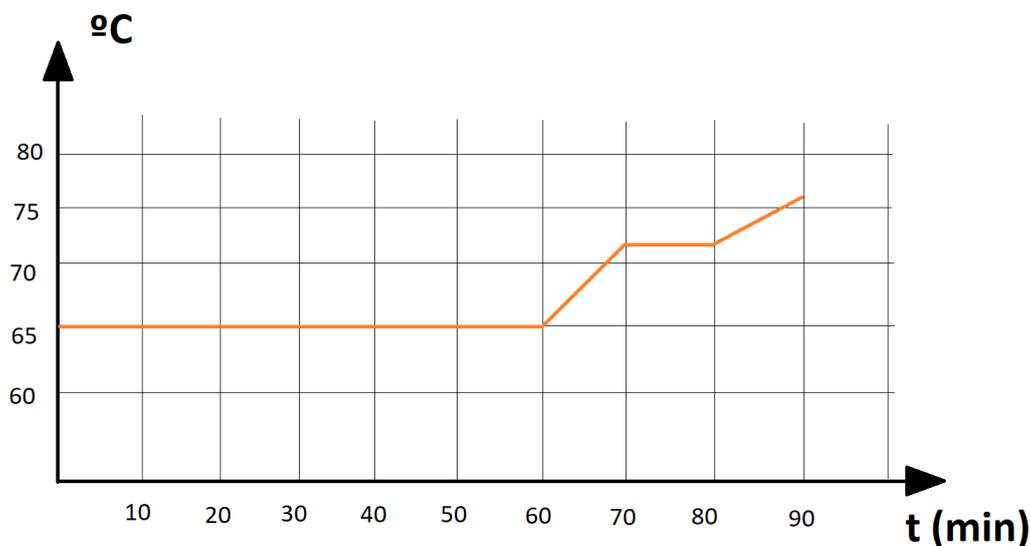


Figura 4.12 Curva de maceración de la prueba. Elaboración propia.

A partir de que haya finalizado la maceración con la última rampa, se empieza a coger las muestras para llevarlas al Fk filtre. Las muestras se extraerán de la caldera por una tubería situada en la parte inferior, haciendo pasar primero dos litros de la mezcla para asegurar que se coge una muestra homogénea y no una con más bagazo debido a la decantación. Cuando se ha separado la primera parte, se sacan 2,5 litros de la caldera para filtrarlo.

Una vez se haya sacado la primera muestra empieza a bombearse mezcla por el circuito con fuerzas de corte. Este proceso se lleva a cabo con la mezcla a 76°C y con el agitador a la misma velocidad. Los casos que se van a estudiar son:

Tabla 4.1: Pruebas a realizar. Elaboración propia.

| <b>Prueba</b>                   | <b>Frecuencia de la bomba (Hz)</b> | <b>Restricciones</b> | <b>Litros/min</b> |
|---------------------------------|------------------------------------|----------------------|-------------------|
| Sin circuito                    | 0                                  | No                   | 0                 |
| Bomba a 15 Hz                   | 15                                 | No                   | 9,33              |
| Bomba a 30 Hz                   | 30                                 | No                   | 18,95             |
| Bomba a 45 Hz                   | 45                                 | No                   | 25,31             |
| Bomba a 30 Hz con restricciones | 30                                 | Si                   | 18,95             |

La primera prueba consistirá en comprobar que el agitador no tiene la velocidad suficiente como para crear regímenes turbulentos significativos que empeoren la filtración de las muestras mientras circulan por el circuito de tuberías durante la segunda y tercera muestra.

Por otra parte, se van a distinguir dos tipos de fuerzas de corte: las producidas por la bomba, y la producida por los codos de las tuberías. Para poder saber cuánto aporta cada una de ellas a la variación de  $F_k$ , se hace una prueba con la bomba a 30 Hz, pero con restricciones, cerrando a la mitad la válvula dentro del circuito de tuberías, disminuyendo el área y aumentando la velocidad en los codos. De esta manera aumentará la pérdida de carga entre los codos y se podrá cuantificar la influencia que tienen estos sobre el valor de  $F_k$ .

### 4.2.3 Filtración

En esta parte se medirá la filtrabilidad de las muestras sacadas de la maceración. Este proceso empieza antes de tomar la primera muestra, ya que, debido a la importancia de la temperatura de la mezcla durante la filtración, se prepara el recipiente del Fk meter calentándolo hasta los 76°C, utilizando el sistema de calefacción con el baño termostático y la camisa que recubre el recipiente. Ya con la temperatura alcanzada, se prepara el falso fondo con la tapa inferior de salida de mosto, comprobando que no haya pérdidas con la junta y la abrazadera clamp.

El Fk meter tiene que estar preparado antes de tomar la primera muestra, ya que es muy importante que esta no baje significativamente de temperatura, ni se oxigene estando fuera del macerador, debido a que estas dos acciones tienen un efecto negativo no deseado en la filtración.

Con el Fk meter preparado para filtrar, se coge la primera muestra de 2,5 litros del macerador y se lleva hasta el recipiente con el filtro. Se debe vaciar lentamente y con cuidado para no empeorar la muestra por la oxigenación, y una vez dentro del recipiente, se remueve sin llegar a agitar la muestra para homogeneizar. A partir de que se acabe de remover, se cuentan 3 minutos para que decante el bagazo en el falso fondo del recipiente de filtración, momento que se aprovecha para cerrar la parte superior con la tapa, la junta y la abrazadera clamp. Se abren las válvulas del sistema de presión con CO<sub>2</sub>, aumentando la presión del recipiente 0,4 bar, y se coloca un recipiente en el soporte con báscula para medir el volumen de mosto filtrado.

Pasados los 3 minutos, en el panel PC se inicia la filtración, por lo que empezará a tomar datos del peso de la báscula, abriendo al mismo tiempo la válvula de salida del filtro, por lo que se empezará a filtrar la mezcla cayendo el mosto al recipiente del soporte.

Durante el proceso de filtración, el Fk meter irá tomando datos cada 20 segundos del peso de mosto filtrado, con lo que más adelante trazará la recta de Ruth linealizando los puntos obtenidos.



*Figura 4.13 Filtración de mosto en Fk meter. Elaboración propia.*

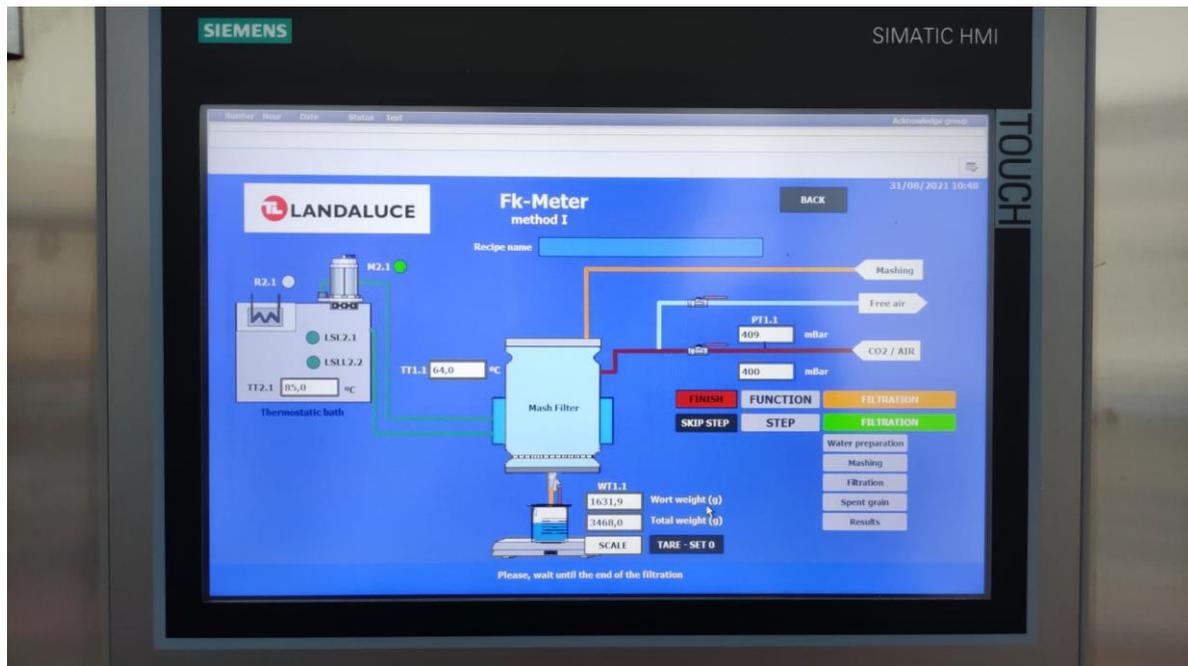


Figura 4.14 Pantalla PC Fk meter durante filtración. Elaboración propia.

La filtración termina cuando el sistema mide menos de 6 gramos de diferencia entre una muestra y 20 segundos después, interpretando el Fk meter como terminada la filtración. La mezcla se separa en el mosto filtrado y la torta de bagazo.

El Fk meter ha estado midiendo el peso del mosto filtrado en función del tiempo, sin embargo, para representar la recta de Ruth y calcular el coeficiente  $F_k$ , hay que pasar ese peso a volumen de mosto. Para ello, del mosto filtrado se debe medir el grado plato. El grado plato se define como los gramos de extracto seco en 100 gramos de mosto a 20°C, y para medirlo se extrae una pequeña muestra del mosto filtrado y se mide con aparato electrónico. Este valor se introduce en el panel PC, obteniendo así el resultado de la prueba en un Excel junto a todos los datos tomados por el Fk meter.



*Figura 4.15 Torta producida al finalizar la filtración. Elaboración propia.*

Tras finalizar la filtración en cada muestra es muy importante limpiar muy bien todas las partes del filtro, ya que después de filtrar se quedan trozos de bagazo dentro del recipiente y favorece a tomar medidas erróneas en las siguientes muestras. Por eso después de cada medida se limpia el falso fondo con un cepillo y el recipiente se llena de agua caliente para quitar los trozos de bagazo. Una vez esté todo limpio se puede volver a preparar el Fk meter para tomar la siguiente muestra.

## 5 RESULTADOS

### 5.1 RESULTADOS DE LAS PRUEBAS

- Prueba sin circuito de tuberías

La primera prueba ha sido sin el circuito de tuberías, para comprobar que la velocidad del agitador era correcta. El resultado de la granulometría con el planchister es:

Tabla 5.1: Prueba sin circuito de tuberías, granulometría. Elaboración propia.

| GRANULOMETRÍA (µm) | Peso grano (g) | %     |       |
|--------------------|----------------|-------|-------|
| 1200               | 15,1           | 7,6%  | 19,2% |
| 1000               | 23,2           | 11,6% |       |
| 500                | 78,2           | 39,1% | 55,8% |
| 250                | 33,2           | 16,6% |       |
| 125                | 18,7           | 9,4%  | 25,1% |
| Fondo              | 31,4           | 15,7% |       |

Por convenio, los porcentajes se agrupan de dos en dos para el resultado de la granulometría.

El test de yodo es positivo y el grado plato una vez macerado es: 21,7°p

Los resultados del Fk filtre son:

Tabla 5.2: Prueba sin circuito de tuberías, valores de  $F_k$ . Elaboración propia.

|                             | $F_k$               |                  |
|-----------------------------|---------------------|------------------|
| Primera muestra             | $0,0756 \cdot 10^6$ | m/s <sup>2</sup> |
| Segunda muestra: 30 minutos | $0,0816 \cdot 10^6$ | m/s <sup>2</sup> |
| Tercera muestra: 70 minutos | $0,0794 \cdot 10^6$ | m/s <sup>2</sup> |

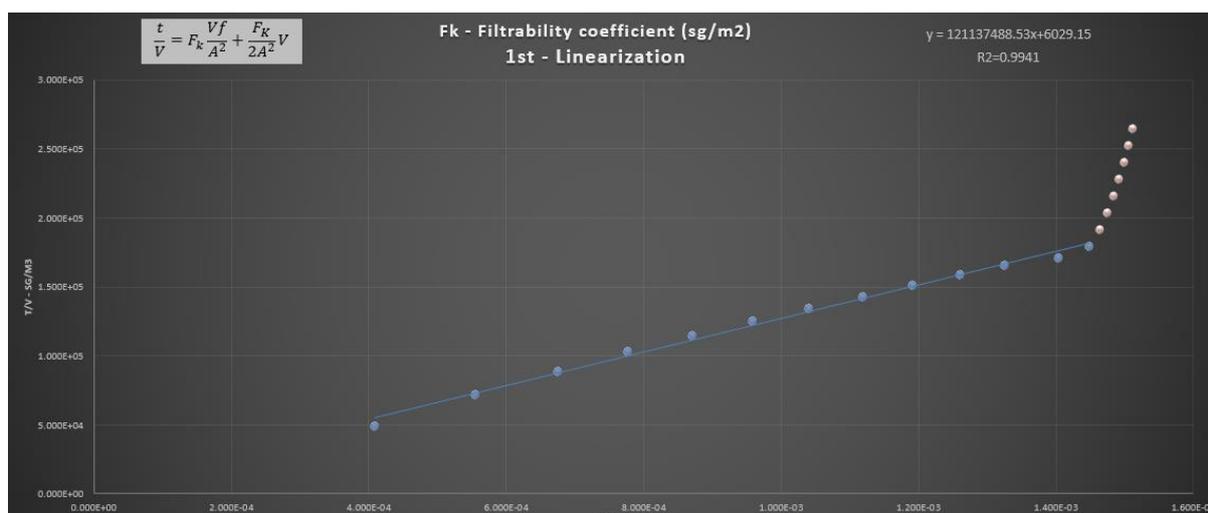


Figura 5.1 Recta de Ruth generada por el Fk meter durante la primera prueba

Esta es la recta de Ruth de la primera muestra, de la cual se obtiene el coeficiente  $F_k$ . Los puntos grises al final de la recta significan que han sido eliminados para hacer la linealización, ya que se toman cuando la filtración ya está casi acabada y solo cae del filtro burbujas con poco mosto y CO<sub>2</sub> que se ha utilizado para aumentar la presión, por lo que no son representativas de la filtración.

- Prueba con la bomba a 15 Hz

El resultado de la granulometría con el planchister es

Tabla 5.3: Prueba con bomba a 15 Hz, granulometría. Elaboración propia.

| GRANULOMETRÍA ( $\mu\text{m}$ ) | Peso grano (g) | %   |     |
|---------------------------------|----------------|-----|-----|
| 1200                            | 12,5           | 6%  | 15% |
| 1000                            | 17,9           | 9%  |     |
| 500                             | 0,9            | 0%  | 58% |
| 250                             | 115,6          | 58% |     |
| 125                             | 20,7           | 10% | 27% |
| Fondo                           | 32,4           | 16% |     |

El test de yodo es positivo y el grado plato es 22<sup>o</sup>p

Los resultados del  $F_k$  filtre son:

Tabla 5.4: Prueba con bomba a 15 Hz, valores de  $F_k$ . Elaboración propia.

|                             | $F_k$              |                  |
|-----------------------------|--------------------|------------------|
| Primera muestra             | $0,064 \cdot 10^6$ | m/s <sup>2</sup> |
| Segunda muestra: 30 minutos | $0,300 \cdot 10^6$ | m/s <sup>2</sup> |
| Tercera muestra: 70 minutos | $0,629 \cdot 10^6$ | m/s <sup>2</sup> |

- Prueba con la bomba a 30 Hz

El resultado de la granulometría con el planchister es

Tabla 5.5: Prueba con bomba a 30 Hz, granulometría. Elaboración propia.

| GRANULOMETRÍA ( $\mu\text{m}$ ) | Peso grano (g) | %     |       |
|---------------------------------|----------------|-------|-------|
| 1200                            | 17,3           | 8,0%  | 18,8% |
| 1000                            | 23,3           | 10,8% |       |
| 500                             | 81,1           | 37,5% | 55,5% |
| 250                             | 39             | 18,0% |       |
| 125                             | 20,5           | 9,5%  | 25,7% |
| Fondo                           | 35,1           | 16,2% |       |

El test de yodo es positivo y el grado plato es 21<sup>o</sup>p

Los resultados del  $F_k$  filtre son:

Tabla 5.6: Prueba con bomba a 30 Hz, valores de  $F_k$ . Elaboración propia.

|                             | $F_k$               |                  |
|-----------------------------|---------------------|------------------|
| Primera muestra             | $0,0544 \cdot 10^6$ | m/s <sup>2</sup> |
| Segunda muestra: 30 minutos | $0,6336 \cdot 10^6$ | m/s <sup>2</sup> |
| Tercera muestra: 70 minutos | $1,316 \cdot 10^6$  | m/s <sup>2</sup> |

- Prueba con la bomba a 45 Hz:

El resultado de la granulometría con el planchister es

Tabla 5.7: Prueba con bomba a 45 Hz, granulometría. Elaboración propia.

| GRANULOMETRÍA ( $\mu\text{m}$ ) | Peso grano (g) | %     |       |
|---------------------------------|----------------|-------|-------|
| 1200                            | 13,7           | 6,5%  | 15,7% |
| 1000                            | 19,7           | 9,3%  |       |
| 500                             | 84,6           | 39,9% | 59,1% |
| 250                             | 40,7           | 19,2% |       |
| 125                             | 20,1           | 9,5%  | 25,2% |
| Fondo                           | 33,3           | 15,7% |       |

El test de yodo es positivo y el grado plato es 21<sup>o</sup>p

Los resultados del  $F_k$  filtre son:

Tabla 5.8: Prueba con bomba a 45 Hz, valores de  $F_k$ . Elaboración propia.

|                             | $F_k$               |                  |
|-----------------------------|---------------------|------------------|
| Primera muestra             | $0,0649 \cdot 10^6$ | m/s <sup>2</sup> |
| Segunda muestra: 30 minutos | $1,58 \cdot 10^6$   | m/s <sup>2</sup> |
| Tercera muestra: 70 minutos | $2,077 \cdot 10^6$  | m/s <sup>2</sup> |

- Prueba con la bomba a 30 Hz con restricciones:

El resultado de la granulometría con el planchister es

Tabla 5.9: Prueba con bomba a 30 Hz con restricciones, granulometría. Elaboración propia.

| GRANULOMETRÍA | Peso grano (g) | %     |       |
|---------------|----------------|-------|-------|
| 1200          | 10,3           | 5,8%  | 15,8% |
| 1000          | 18             | 10,1% |       |
| 500           | 79,1           | 44,2% | 61,5% |
| 250           | 31             | 17,3% |       |
| 125           | 14,6           | 8,2%  | 22,6% |
| Fondo         | 25,9           | 14,5% |       |

El test de yodo es positivo y el grado plato es 20,2<sup>o</sup>p

Los resultados del  $F_k$  filtre son:

Tabla 5.10: Prueba con bomba a 30 Hz con restricciones, valores de  $F_k$ . Elaboración propia.

|                             | $F_k$               |                  |
|-----------------------------|---------------------|------------------|
| Primera muestra             | $0,0583 \cdot 10^6$ | m/s <sup>2</sup> |
| Segunda muestra: 30 minutos | $0,9793 \cdot 10^6$ | m/s <sup>2</sup> |
| Tercera muestra: 70 minutos | $1,932 \cdot 10^6$  | m/s <sup>2</sup> |

## 5.2 CONCLUSIONES

De los ensayos con el planchister se puede obtener la media de granulometría de todas las pruebas:

Tabla 5.11: Granulometría media de todas las pruebas. Elaboración propia.

| GRANULOMETRÍA ( $\mu\text{m}$ ) |        |
|---------------------------------|--------|
| 1200                            | 16,9 % |
| 1000                            |        |
| 500                             | 57,98% |
| 250                             |        |
| 125                             | 25,2%  |
| Fondo                           |        |

Con lo que se afirma la validez de todas las pruebas por la granulometría, ya que ninguna varía más del 5% respecto a la media, con lo que en ese aspecto las pruebas son equivalentes.

Respecto a la primera prueba, sin el circuito de tuberías, se comprueba que las palas no tienen la velocidad suficiente como para generar fuerzas de corte que empeoren su filtrabilidad. Aunque para estas pruebas a pequeña escala ocurra esto, es importante tener en cuenta que esto no es igual a nivel industrial, con palas muchos más grandes donde en los extremos alcanzan velocidades mucho más significativas, ya que experimentalmente se sabe que sí tienen influencia en la filtrabilidad.

Con todas las pruebas válidas y sabiendo que se pueden comparar unas a otras debido a su granulometría y a que no hay ningún otro efecto que afecte a la filtración,

se empezará comparando todas las pruebas que no tienen restricciones, para saber los efectos totales de las fuerzas de corte sobre la filtrabilidad.

Tabla 5.12: Resultados  $F_k$  con la bomba a todas las frecuencias. Elaboración propia.

|               | $F_k$ primera muestra (m/s <sup>2</sup> ) | $F_k$ 30 min (m/s <sup>2</sup> ) | $F_k$ 70 min (m/s <sup>2</sup> ) |
|---------------|---|----------------------------------|----------------------------------|
| Bomba a 15 Hz | $0,064 \cdot 10^6$                        | $0,3 \cdot 10^6$                 | $0,69 \cdot 10^6$                |
| Bomba a 30 Hz | $0,054 \cdot 10^6$                        | $0,634 \cdot 10^6$               | $1,316 \cdot 10^6$               |
| Bomba a 45 Hz | $0,0649 \cdot 10^6$                       | $1,58 \cdot 10^6$                | $2,077 \cdot 10^6$               |

El resultado es el esperado, cuanto mayor velocidad de la bomba y más tiempo en el sistema de tuberías, mayor es su coeficiente  $F_k$ , por lo que peor será su filtrabilidad, tardando más tiempo en filtrar una misma mezcla.

Sin embargo, para cuantificar el cambio de filtrabilidad en cada prueba, se tendrá en cuenta el incremento del coeficiente  $F_k$  durante los primeros 30 minutos, y luego el incremento de  $F_k$  entre esos 30 minutos y los 40 siguientes.

Tabla 5.13: Incrementos de  $F_k$  con la bomba a todas las frecuencias. Elaboración propia.

|               | $\Delta F_k$ 30 min (m/s <sup>2</sup> ) | $\Delta F_k$ 40 min (m/s <sup>2</sup> ) |
|---------------|---|---|
| Bomba a 15 Hz | $0,24 \cdot 10^6$                       | $0,39 \cdot 10^6$                       |
| Bomba a 30 Hz | $0,58 \cdot 10^6$                       | $0,68 \cdot 10^6$                       |
| Bomba a 45 Hz | $1,52 \cdot 10^6$                       | $0,5 \cdot 10^6$                        |

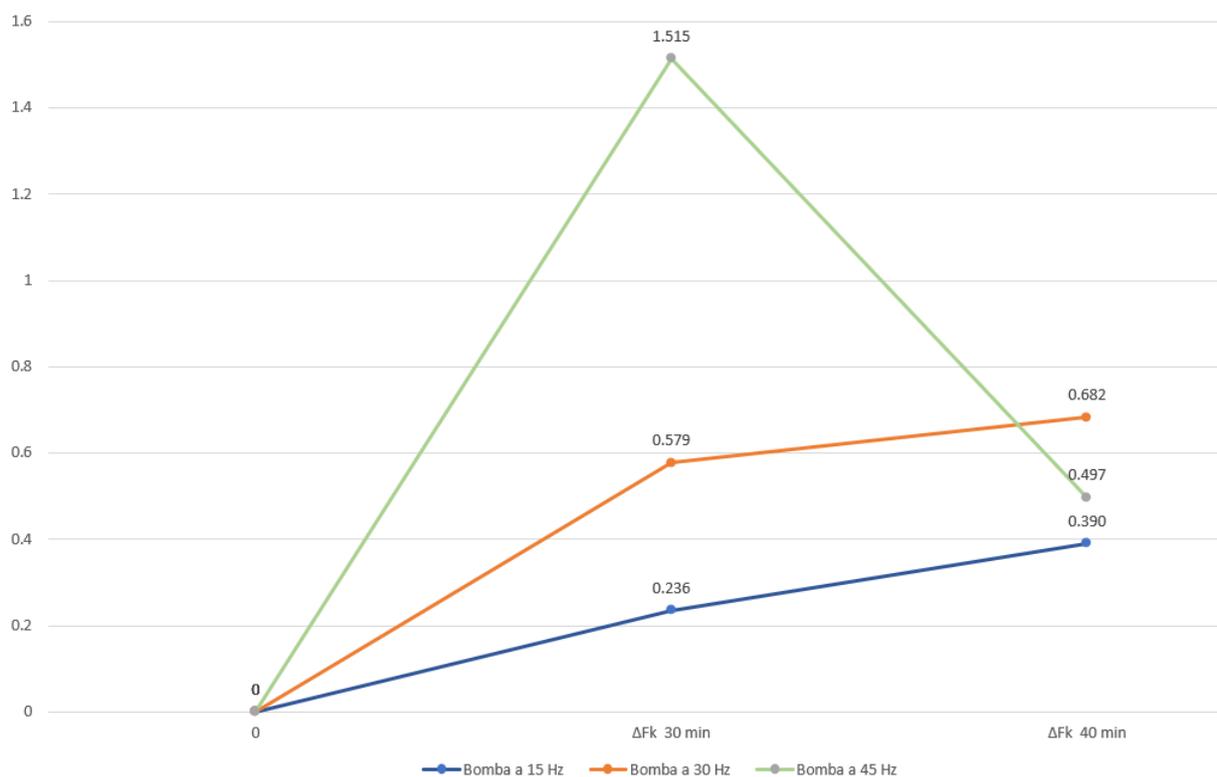


Figura 5.2 Gráfica de los incrementos de  $F_k$ . Elaboración propia.

Se observa un aumento del incremento del  $F_k$  para todas las muestras tomadas a los 30 primeros minutos, sin embargo, para los 40 siguientes, este incremento va disminuyendo respecto del primero cuanto mayor es la velocidad de la bomba. Este resultado concuerda con la teoría, ya que como se explicó, este efecto negativo en la filtrabilidad debido a las fuerzas de corte se origina por la deformación de las moléculas de  $\beta$ -glucano, y aunque el valor de  $F_k$  aumente con el tiempo, cada vez quedarán menos moléculas de  $\beta$ -glucano para deformar.

Las fuerzas de corte en el circuito son producidas por la bomba y por el circuito de pérdidas con los codos en las tuberías y son los responsables de empeorar la filtrabilidad. Por eso mismo se ha hecho una prueba con la bomba a 30 Hz, pero con las válvulas del circuito cerradas a la mitad, aumentando la velocidad del circuito y la influencia que tiene este sobre el incremento de  $F_k$ .

Los resultados con la bomba a 30 Hz son los siguientes:

Tabla 5.14: valores de  $F_k$  con la bomba a 30 Hz sin y con restricciones. Elaboración propia.

|                                    | $F_k$ primera muestra<br>(m/s <sup>2</sup> ) | $F_k$ 30 min (m/s <sup>2</sup> ) | $F_k$ 70 min (m/s <sup>2</sup> ) |
|------------------------------------|--|----------------------------------|----------------------------------|
| Bomba a 30 Hz                      | $0,054 \cdot 10^6$                           | $0,634 \cdot 10^6$               | $1,316 \cdot 10^6$               |
| Bomba a 30 Hz<br>con restricciones | $0,0583 \cdot 10^6$                          | $0,979 \cdot 10^6$               | $1,932 \cdot 10^6$               |

El aumento de la velocidad en los codos incrementa significativamente el valor  $F_k$  respecto a la prueba sin restricciones, aproximadamente un 50% más alto en las dos muestras.

Con estos resultados se llega a la conclusión de que los codos y la bomba tienen un efecto parecido sobre la filtrabilidad, llegándose hasta triplicar el tiempo de filtración en los casos más extremos de estos ensayos. Por otra parte, el aumento de tiempo de filtración en un filtro prensa industrial debido a las fuerzas de corte, dependerá también del área del filtro y de las características de la mezcla que se utilice, por lo que no se puede cuantificar directamente ese aumento de tiempo en una planta real, ya que harían falta datos del filtro y de la mezcla. Sin embargo, se puede afirmar que las fuerzas de corte tienen un efecto relevante en la filtrabilidad, teniendo el mismo peso un aumento de la velocidad de la bomba, como un aumento de velocidad de la mezcla al cambiar de diámetro de tubería. Además, se afirma también que el aumento de tiempo de filtración por fuerzas de corte tiene más repercusión en cambios a bajas velocidades, ya que en altas quedan pocas moléculas de  $\beta$ -glucano para transformar, estando el sistema muy mal optimizado

Con este estudio se demuestra que a la hora de diseñar una planta de fabricación de cerveza hay que tener en cuenta estos efectos cuando se diseñe el circuito de tuberías entre el macerador y el filtro prensa, ya que un sistema mal optimizado

provoca un aumento del tiempo de filtración, disminuyendo la capacidad de producción de la planta.



## 6 ANEXOS

### 6.1 GRÁFICAS GENERADAS POR EL FK METER PARA TODAS LAS PRUEBAS

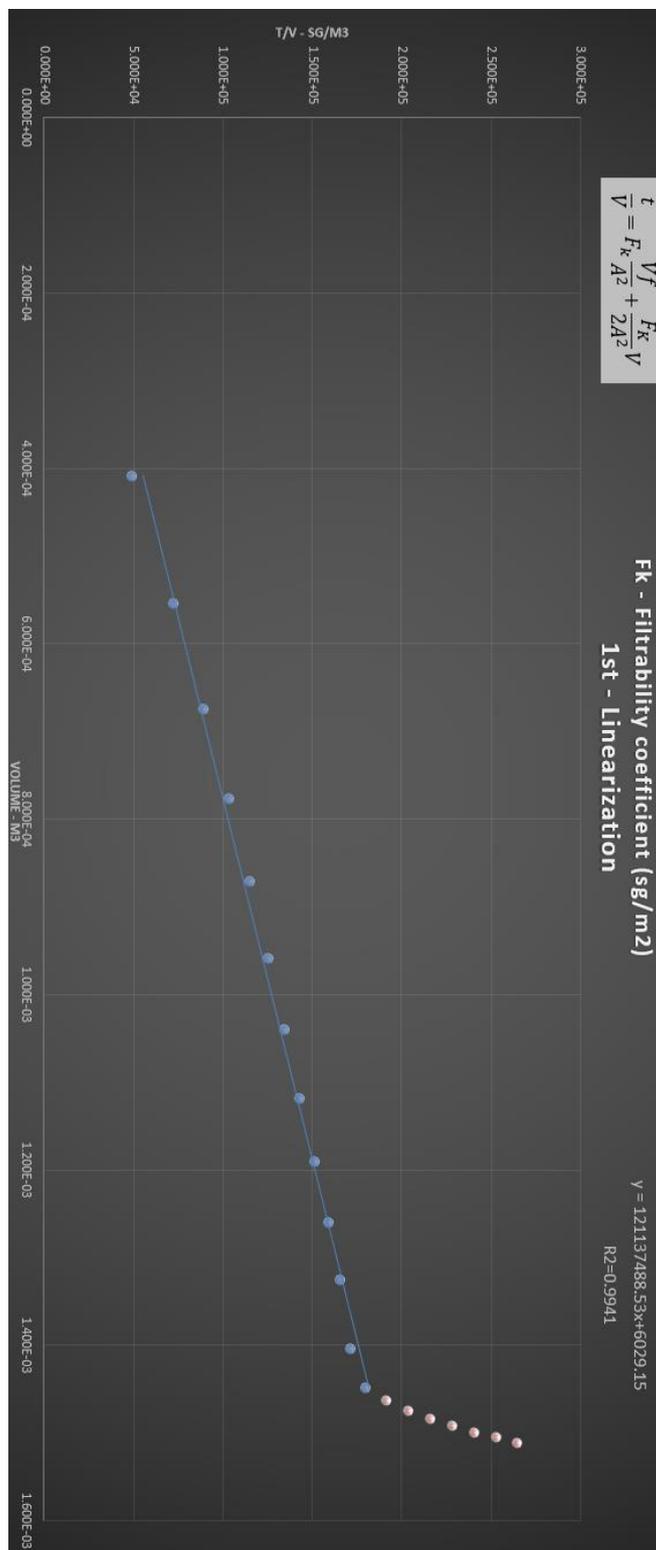


Figura 6.1 Gráfica FK meter primera muestra sin circuito de tuberías

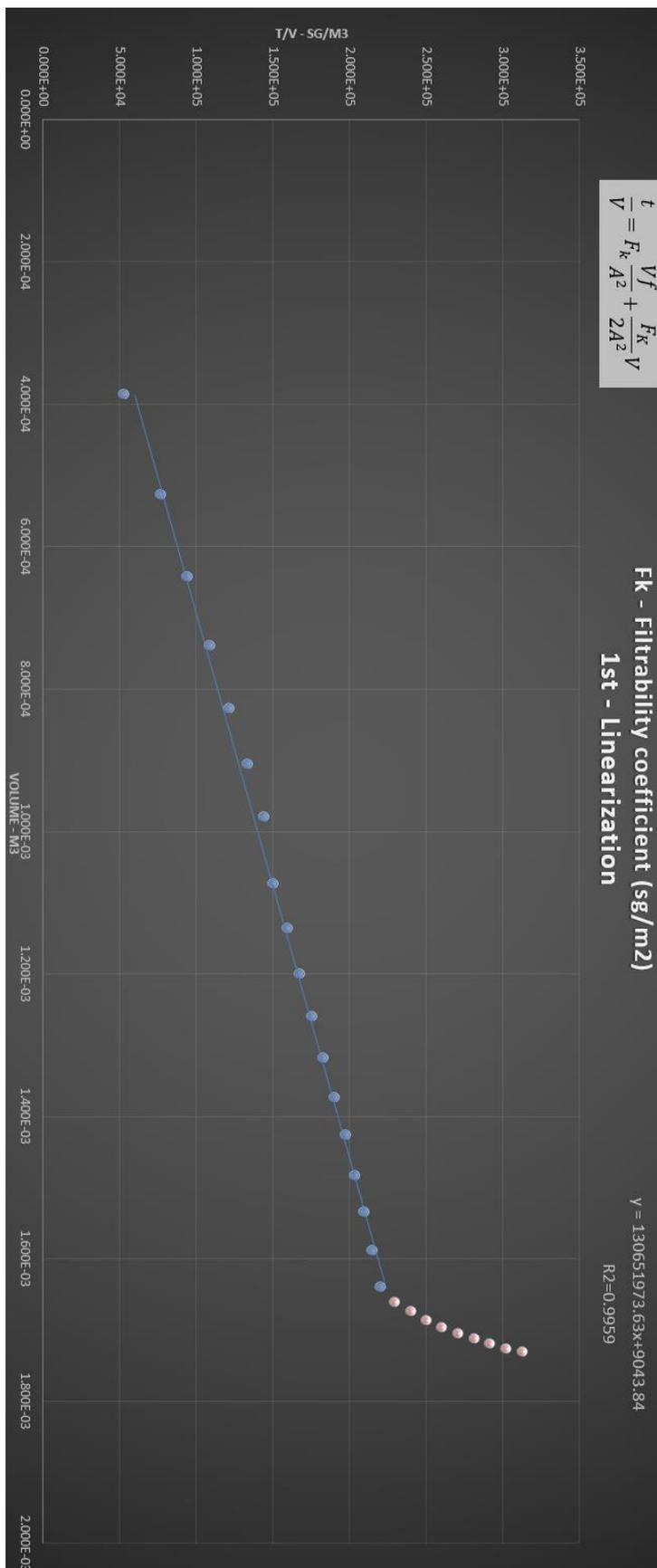


Figura 6.2 Gráfica FK meter segunda muestra sin circuito de tuberías





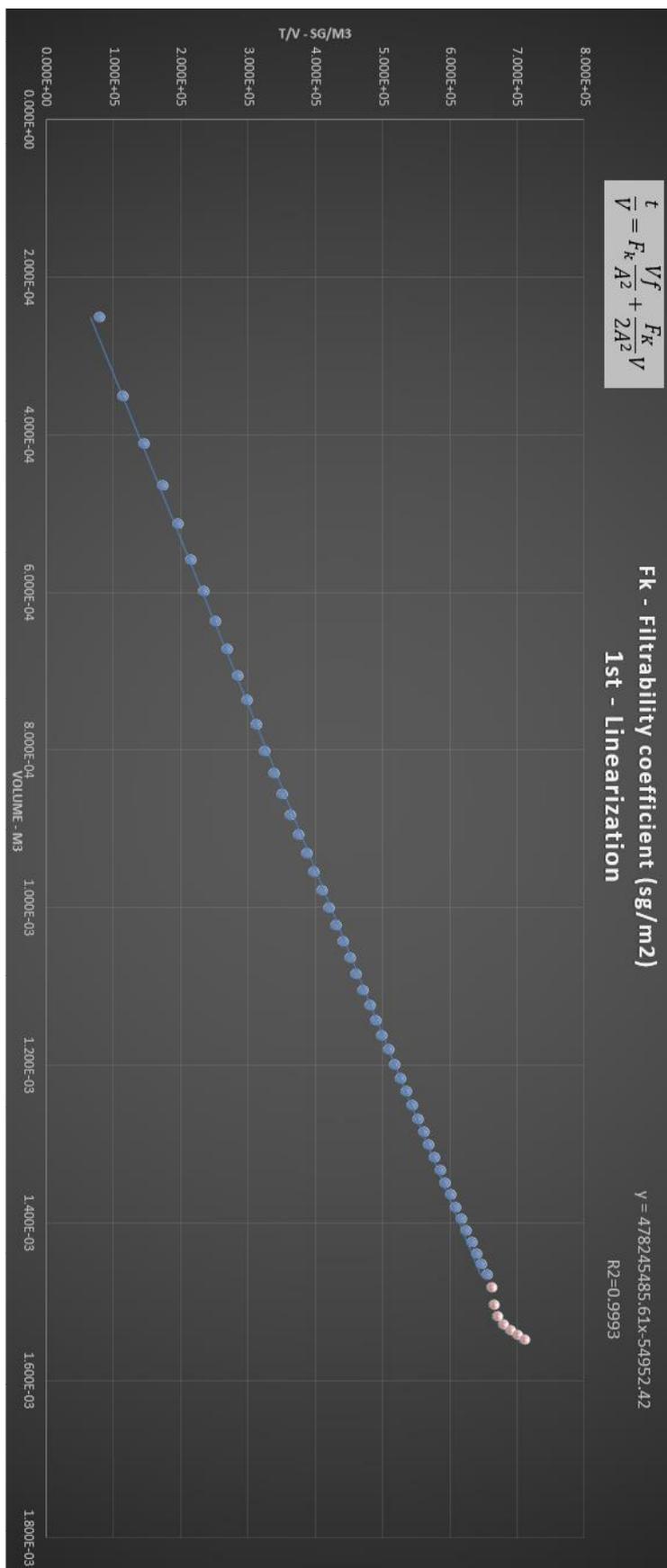


Figura 6.5 Gráfica FK meter segunda muestra bomba a 15 Hz

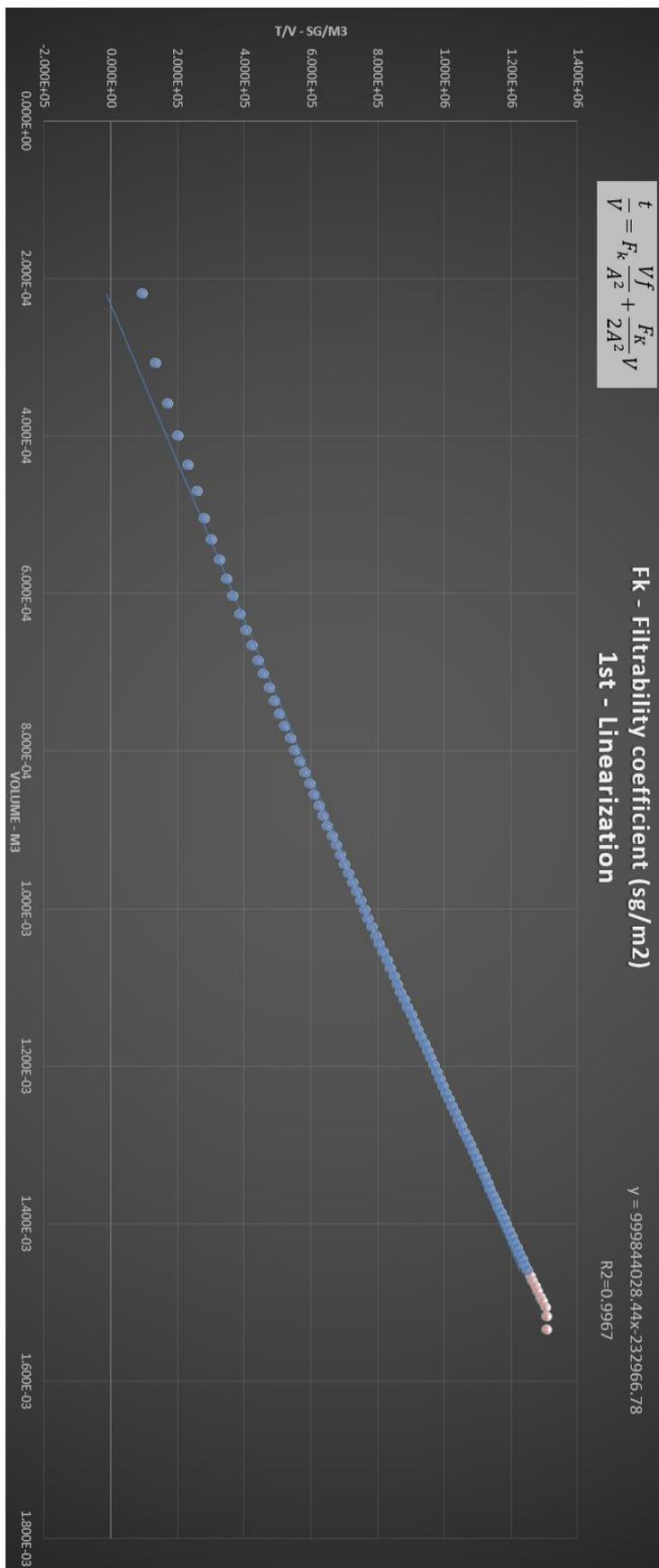


Figura 6.6 Gráfica FK meter tercera muestra bomba a 15 Hz



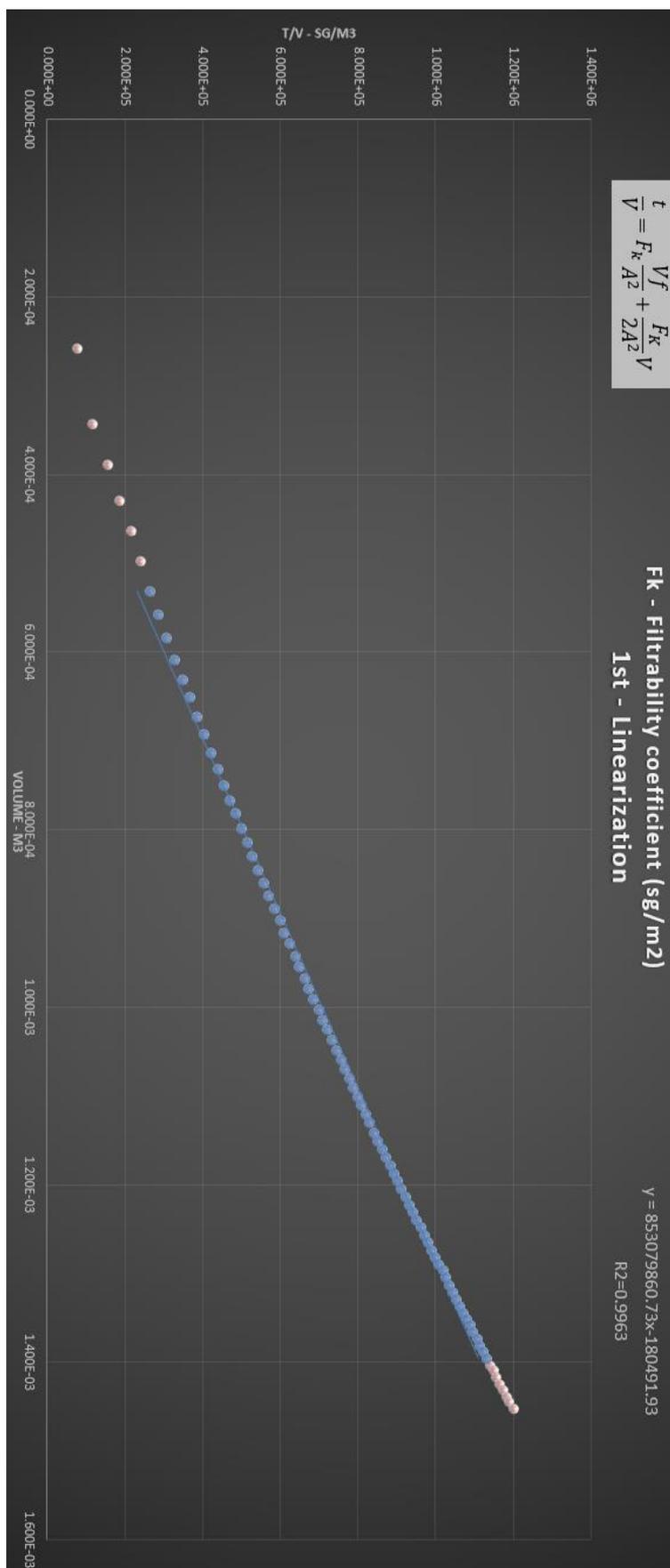


Figura 6.8 Gráfica FK meter segunda muestra bomba a 30 Hz

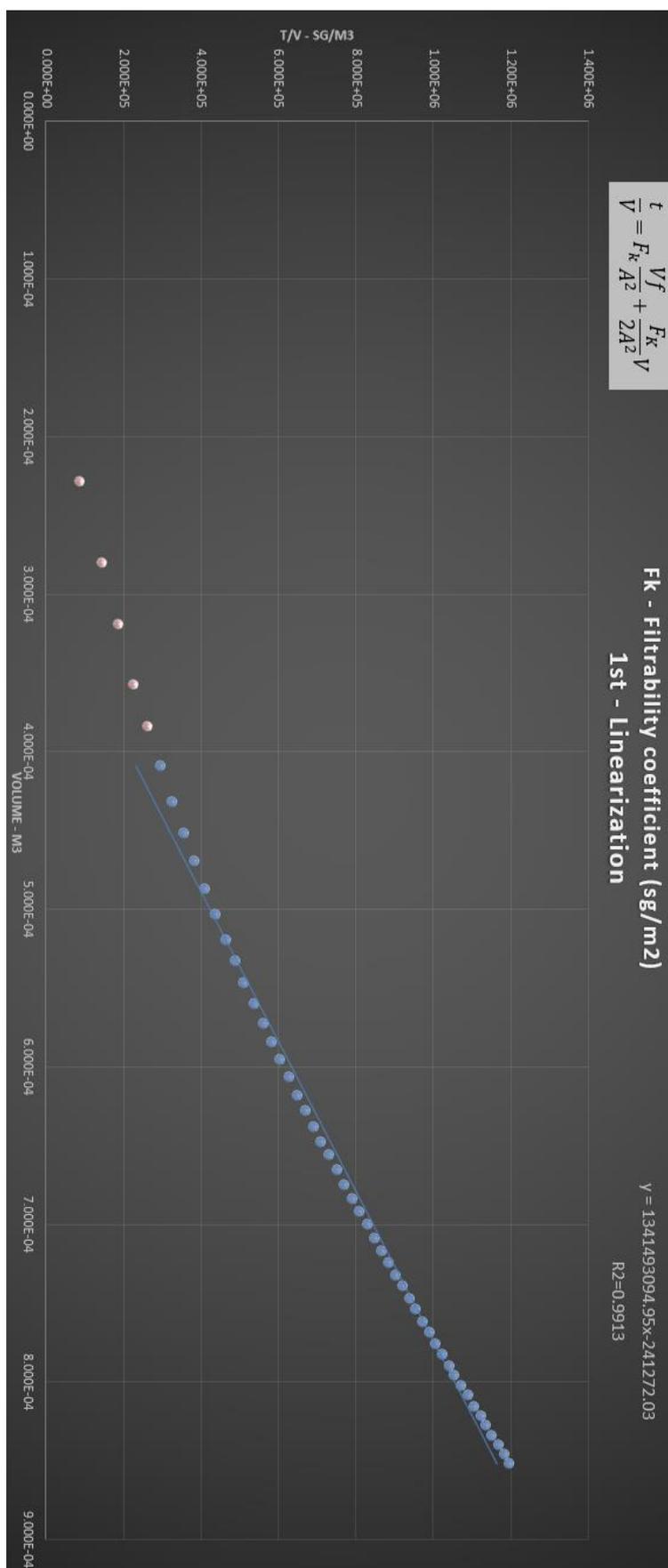


Figura 6.9 Gráfica FK meter tercera muestra bomba a 30 Hz

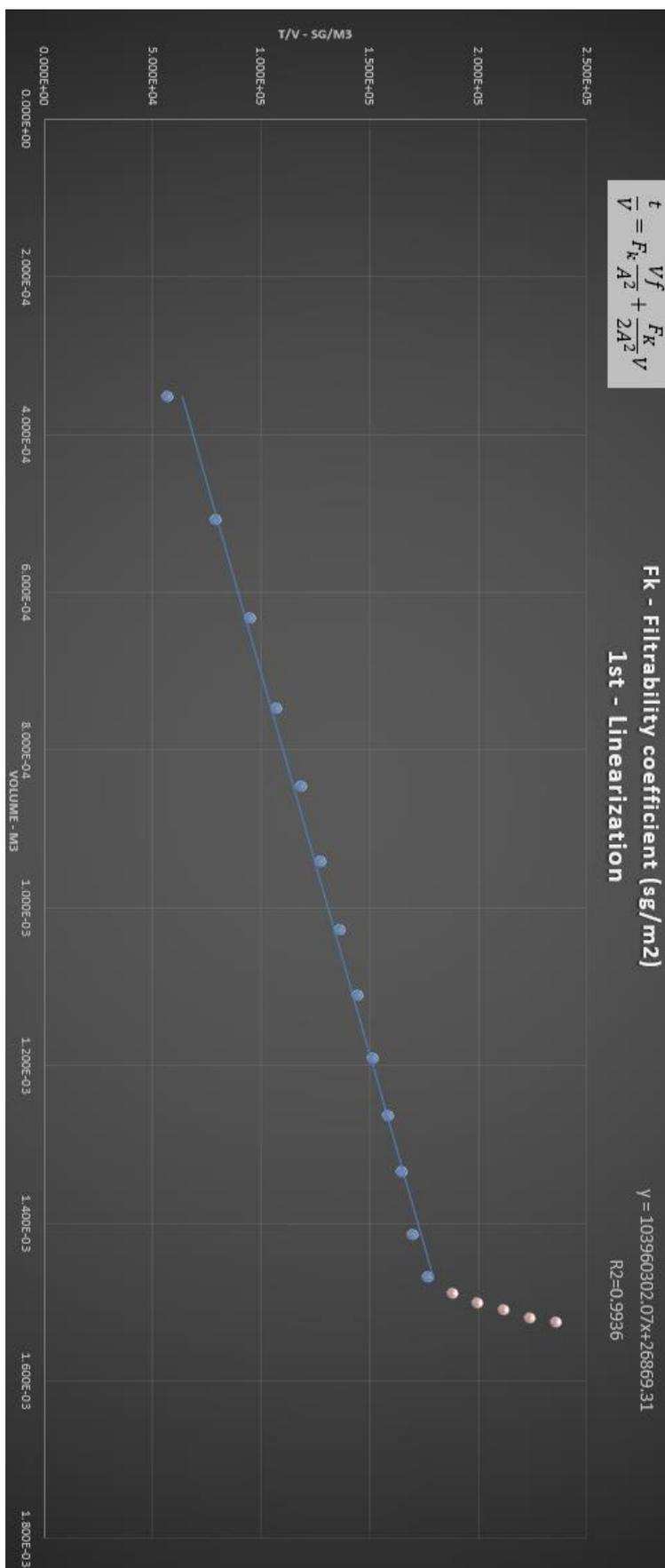


Figura 6.10 Gráfica FK meter primera muestra bomba a 45 Hz

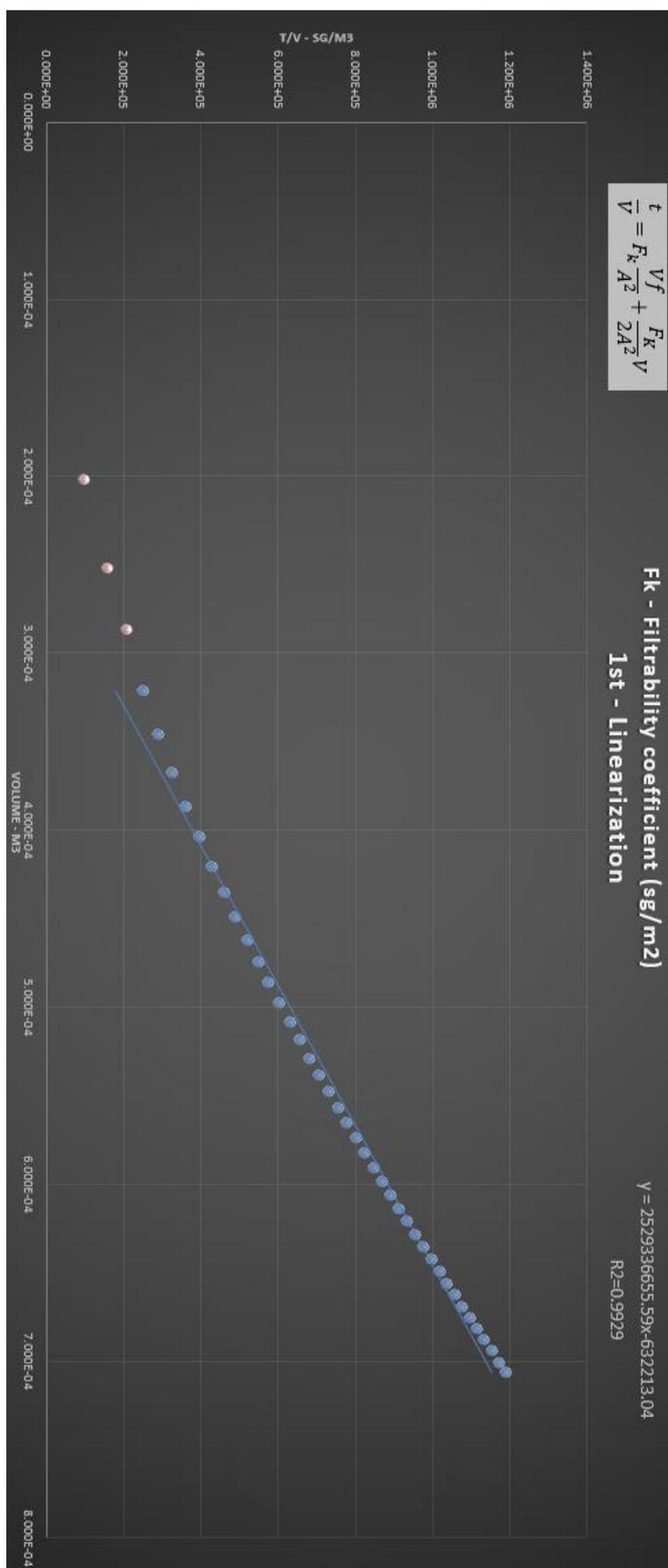


Figura 6.11 Gráfica FK meter segunda muestra bomba a 45 Hz





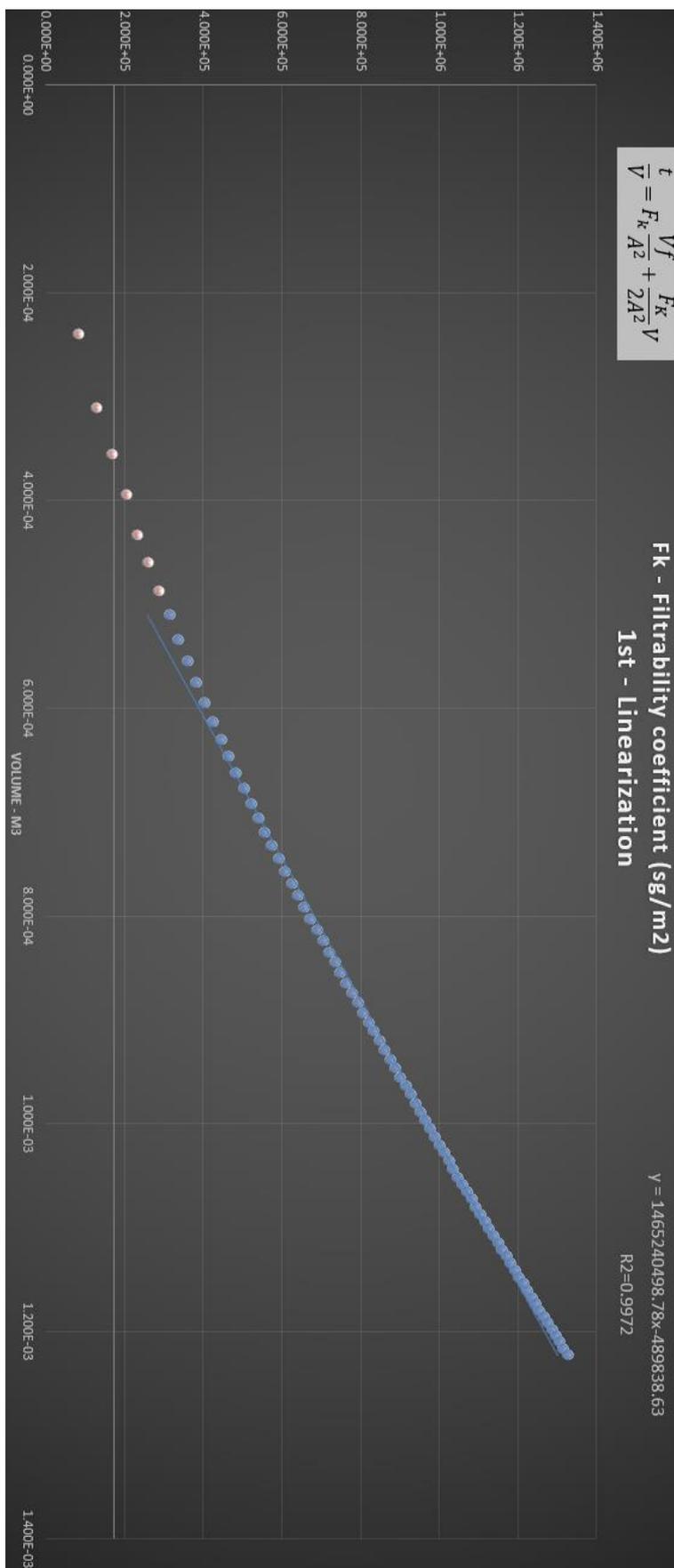


Figura 6.14 Gráfica FK meter segunda muestra bomba a 30 Hz con restricciones





## 7 BIBLIOGRAFÍA

- Wolfgang Kunze, Tecnología para Cerveceros y Malteros, Primera edición en español, 2006
- Curso general de fabricación de cerveza, ESCYM, Módulo II
- Trans IChemE, Vol 81, Part C, March 2003
- IOB Brewing Workbook One and Two
- K. L. TSE, C. D. BOSWELL, A. W. NIENOW and P. J. FRYER, ASSESSMENT OF THE EFFECTS OF AGITATION ON MASHING FOR BEER PRODUCTION IN A SMALL-SCALE VESSE, University of Birmingham, Edgbaston, Birmingham, UK