

**Escuela Superior Politécnica del Litoral**

**Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la Producción**

Reducción de extracto de últimas aguas en un proceso de elaboración de cerveza

INGE-3093

**Proyecto Integrador**

Previo la obtención del Título de:

**Ingenieros Industriales**

Presentado por:

**Marlon Alejandro Pacheco Chica**

**Erick Ronald Zúñiga Pilatasig**

Guayaquil - Ecuador

Año: 2025

## Agradecimientos

---

Quiero agradecer a mi madre, Martha Pilatasig, pilar fundamental de mi vida y mi carrera universitaria. Gracias por tu apoyo incondicional, tus consejos y ese esfuerzo constante que hizo posible esta meta; eres la razón de este logro. A la memoria de mi padre, Jovany Zúñiga, por formar en mi infancia la esencia de quien soy hoy; su recuerdo me acompaña en este éxito profesional.

A Dayana Ruales, por impulsarme a dar lo mejor de mí para concluir este ciclo, y a mi amiga incondicional, María Belén Díaz, por ser mi consejera, gracias a ambas por nunca dudar de mí.

Finalmente, a mi compañero de tesis por el sacrificio y entrega mutua para culminar este trabajo, y a mis amigos de la carrera; gracias por las anécdotas, enseñanzas y noches de videojuegos que siempre llevaré conmigo.

Att.

Erick Ronald Zúñiga Pilatasig

## Agradecimientos

---

Quiero agradecer a la ESPOl por brindarme las herramientas necesarias para culminar mis estudios universitarios.

A mi familia, especialmente a mis padres, por su apoyo incondicional y brindarme la fuerza necesaria para continuar mis estudios.

Gracias a los amigos que logré forjar durante mi tiempo dentro de la universidad, con agradecimiento a Luis Fernando Medina por su amistad y consejos compartidos.

Quiero agradecer a las personas que ya no se encuentran con nosotros pero que siempre me ofrecieron su ayuda cuando más la necesitaba.

Att.

Marlon Alejandro Pacheco Chica

---

## Declaración Expresa

---

Nosotros Erick Ronald Zúñiga Pilatasig y Marlon Alejandro Pacheco Chica acordamos y reconocemos que:

La titularidad de los derechos patrimoniales de autor (derechos de autor) del proyecto de graduación corresponderá al autor o autores, sin perjuicio de lo cual la ESPOL recibe en este acto una licencia gratuita de plazo indefinido para el uso no comercial y comercial de la obra con facultad de sublicenciar, incluyendo la autorización para su divulgación, así como para la creación y uso de obras derivadas. En el caso de usos comerciales se respetará el porcentaje de participación en beneficios que corresponda a favor del autor o autores.

La titularidad total y exclusiva sobre los derechos patrimoniales de patente de invención, modelo de utilidad, diseño industrial, secreto industrial, software o información no divulgada que corresponda o pueda corresponder respecto de cualquier investigación, desarrollo tecnológico o invención realizada por mí/nosotros durante el desarrollo del proyecto de graduación, pertenecerán de forma total, exclusiva e indivisible a la ESPOL, sin perjuicio del porcentaje que me/nos corresponda de los beneficios económicos que la ESPOL reciba por la explotación de mi/nuestra innovación, de ser el caso.

En los casos donde la Oficina de Transferencia de Resultados de Investigación (OTRI) de la ESPOL comunique al/los autor/es que existe una innovación potencialmente patentable sobre los resultados del proyecto de graduación, no se realizará publicación o divulgación alguna, sin la autorización expresa y previa de la ESPOL.

Guayaquil, 23 Octubre del 2025.

Erick Zúñiga P

Erick Ronald Zúñiga

Pilatasig

C.I.: 0954223103

Marlon Pacheco

Marlon Alejandro

Pacheco Chica

C.I.: 0943336248

## Evaluadores

---

---

**M.Sc. María Fernanda López**

Profesor de Materia

---

**M.Sc. María Laura Retamales**

Tutor de proyecto

## Resumen

La producción de cerveza a nivel industrial utiliza granos de malta como principal materia prima para la elaboración de varios lotes de cerveza. Este proyecto se desarrolló con el propósito de disminuir la pérdida de extracto de malta presente en aguas residuales conocida como "últimas aguas", generada durante la etapa de filtración de un proceso de cocimiento de cerveza industrial. El objetivo inicial consistió en reducir los kilogramos de extracto desperdiciados en un 11,15% para cada lote de cerveza tipo 100% malta. Para lograrlo, se implementó la metodología DMAIC (Definir, Medir, Analizar, Mejorar y Controlar), permitiendo la identificación precisa de las causas raíz de la merma. Para lograr el objetivo del proyecto, se implementaron y cuantificaron tres soluciones principales: la optimización de la secuencia de ingreso a la etapa de filtración, la estandarización de la calidad de molienda mediante el mantenimiento correctivo del molino, y un diseño de experimentos factorial para optimizar los parámetros de flujo y volumen de agua. Posterior a la implementación de las soluciones se registró una mejora del 11.76% en la reducción de merma por cocimiento, superando la meta establecida.

**Palabras Clave:** Filtración, Cerveza, Lean Six Sigma, Últimas aguas, Extracto

### *Abstract*

Industrial beer production uses malted grains as the primary raw material for brewing multiple batches. This project was developed with the purpose of decreasing the loss of malt extract present in the wastewater known as "last running," generated during the filtration stage of the industrial brewing process. The initial objective was to reduce the kilograms of wasted extract by 11.15% for each batch of 100% malt beer. To achieve this, the DMAIC methodology (Define, Measure, Analyze, Improve, and Control) was implemented, allowing for the precise identification of the root causes of this loss. To reach the project's goal, three main solutions were implemented and quantified: the optimization of the entry sequence to the filtration stage, the standardization of milling quality through corrective maintenance of the mill, and a factorial design of experiments to optimize water flow and volume parameters. Following the implementation of these solutions, an 11.76% improvement in extract loss reduction per brew was recorded, surpassing the established target.

**Keywords:** Filtration, Beer, Lean Six Sigma, Last running, Extract.

## Índice general

|  |      |
|--|------|
| Resumen .....  | I    |
| <i>Abstract</i> .....  | II   |
| Índice general .....   | III  |
| Abreviaturas .....   | VI   |
| Simbología .....   | VII  |
| índice de figuras .....  | VIII |
| Índice de tablas.....  | X    |
| Capítulo 1 .....   | 1    |
| 1.1. <i>Introducción</i> .....                                 | 1    |
| 1.2 <i>Descripción del Problema</i> .....                      | 1    |
| 1.3 <i>Justificación del Problema</i> .....                    | 2    |
| 1.4. <i>Objetivos</i> .....                                    | 3    |
| 1.4.1 Objetivo general .....                                   | 3    |
| 1.4.2 Objetivos específicos.....                               | 3    |
| 1.5 <i>Marco teórico</i> .....                                 | 3    |
| 1.5.1. Fundamentos del Proceso de Elaboración de Cerveza ..... | 3    |
| 1.5.2 Definiciones Técnicas Clave .....                        | 5    |
| 1.5.3. Etapa de Filtración (Lautering) .....                   | 6    |
| 1.5.4    Cálculo de extracto.....                              | 7    |
| 1.5.5    Herramientas de Mejora (Lean Six Sigma).....          | 8    |
| 1.5.6 Herramientas Estadísticas.....                           | 9    |
| Capítulo 2 .....   | 11   |
| 2. Metodología. ....   | 11   |
| 2.1. <i>Recolección de datos</i> .....                         | 11   |
| 2.2. <i>Verificación de datos</i> .....                        | 12   |
| 2.3. <i>Análisis de capacidad</i> .....                        | 13   |

|  |    |
|--|----|
| 2.4. Estratificación.....  | 14 |
| 2.5. Posibles causas .....   | 15 |
| 2.5.1. Verificación de causas .....  | 17 |
| 2.6. Implementación de soluciones .....  | 20 |
| 2.6.1. S1: Optimización de la Secuencia de Filtración) .....                           | 20 |
| 2.6.2. S2: Estandarización de la Calidad de Molienda. ....                             | 23 |
| 2.6.3. S3: Diseño de experimento factorial .....                                       | 25 |
| Capítulo 3 .....   | 27 |
| 3. Resultados y análisis .....   | 27 |
| 3.1. Resultados de la implementación de mejoras.....                                   | 27 |
| 3.1.1. Resultados de la Solución S1: Optimización de la Secuencia de Filtración .....  | 27 |
| 3.1.2. Resultados de la Solución S2: Estandarización de la Calidad de Molienda. ....   | 29 |
| 3.1.3. Resultados de la Solución S3: Diseño Factorial de Parámetros.....               | 33 |
| 3.2. Resultados de implementación .....  | 35 |
| 3.3. Costos de implementación .....  | 38 |
| 3.3.1. Costo implementación de Solución S1: Optimización de la Secuencia de Filtración | 38 |
| 3.3.2. Costo implementación de Solución S2: Estandarización de la Calidad de Molienda. | 38 |
| 3.3.3. Costo implementación de Solución S3: Estandarización de la Calidad de Molienda. | 39 |
| 3.3.4. Resumen costos de implementación .....  | 39 |
| 3.4. Resultados alineados al Triple Bottom Line.....                                   | 40 |
| 3.4.1. Dimensión Económica (Profit): .....   | 40 |
| 3.4.2. Dimensión Ambiental (Planet).....   | 41 |
| 3.4.3. Dimensión Social (People).....  | 41 |
| Capítulo 4 .....   | 43 |
| 4.1 Conclusiones y recomendaciones.....  | 43 |

|                            |    |
|----------------------------|----|
| 4.1.1 Conclusiones.....    | 43 |
| 4.1.2 Recomendaciones..... | 44 |

## Abreviaturas

ESPOL Escuela Superior Politécnica del Litoral

hl Hectolitros

HWL High Water Level

Kg Kilogramos

La Litros

LWL Low Water Level

Max Máximo

min Minutos

Min Mínimo

ml Mililitros

## Simbología

°P Grados plato

## índice de figuras

|  |    |
|--|----|
| Figura 1. Serie de tiempo extracto perdido en últimas aguas .....  | 2  |
| Figura 2. Mapa del proceso de área Brewhouse .....   | 5  |
| Figura 3. Proceso Lautering.....   | 7  |
| Figura 4. Registro Autocontrol 2025 para el área de cocimiento .....   | 12 |
| Figura 5. Verificación de datos prueba T .....   | 13 |
| Figura 6. Análisis de capacidad kilogramos de extracto perdido en ultimas aguas .....                          | 14 |
| Figura 7. Gráfica de intervalos análisis ANOVA estratificación por Marca .....                                 | 15 |
| Figura 8. Nivel de impacto para causas potenciales.....  | 16 |
| Figura 9. Ponderación para causas potenciales.....   | 16 |
| Figura 10. Plan de verificación de causas.....   | 17 |
| Figura 11, Gráfica de control de kg de extracto perdido en últimas aguas. ....                                 | 17 |
| Figura 12. Gráfica de dispersión extracto perdido (Kg) en últimas aguas vs volumen de ultimas aguas (hl) ..... | 18 |
| Figura 13. Regresión lineal: Diagrama de Pareto para kilogramos de extracto de últimas aguas                   | 18 |
| Figura 14. Posibles soluciones por causa raíz .....  | 20 |
| Figura 15. Solución-S1: Diseño de experimentos de un solo factor (ANOVA).....                                  | 21 |
| Figura 16. Detalle de niveles a evaluar en solución S1 .....   | 22 |
| Figura 17. Formato de recolección de datos para solución S1 .....  | 23 |
| Figura 18. Prueba de Calidad para cáscara de malta post molienda .....   | 24 |
| Figura 19. Registro prueba de granulometría y volumen de cáscara .....   | 24 |
| Figura 20. Formato de recolección de datos para S3.....  | 26 |
| Figura 21. Análisis de varianza ANOVA para solución S1 .....   | 27 |
| Figura 22. Resultados por nivel de implementación S1.....  | 28 |
| Figura 23. Gráfico de intervalos pruebas de calidad y volumen de últimas aguas .....                           | 30 |
| Figura 24. Análisis de varianza ANOVA pruebas de calidad para solución S2 .....                                | 30 |
| Figura 25. Pruebas de calidad de etapa molienda (cáscaras de malta) realizadas.....                            | 31 |
| Figura 26. Análisis de capacidad en MINITAB para pruebas de calidad de etapa molienda .....                    | 31 |
| Figura 27. Diagrama de cajas para productos 1 y 2 que cumplen con criterios de calidad de molienda. ....       | 32 |
| Figura 28. Extracto perdido esperado antes y despues de mantenimiento correctivo .....                         | 32 |
| Figura 29. Resultados de análisis DOE en MINITAB para solución S3. ....  | 34 |

|   |    |
|---|----|
| Figura 30. Niveles óptimos para parámetros de filtración de segundo mosto .....                       | 34 |
| Figura 31. Gráfica de barras para resultados individuales por soluciones implementadas .....          | 36 |
| Figura 32. Resumen de resultados individuales por soluciones implementadas .....                      | 36 |
| Figura 33. Reducción de extracto perdido en últimas aguas para productos 100% malta .....             | 37 |
| Figura 34. Gráfica de cajas de extracto perdido antes y después de implementación de soluciones ..... | 37 |
| Figura 35. Diagrama SIPOC proceso cocimiento .....  | 46 |
| Figura 36. Diagrama de afinidad .....   | 46 |
| Figura 37. Diagrama de árbol CTQ .....  | 47 |
| Figura 38. Diagrama ISHIKAWA .....  | 47 |
| Figura 39. Pareto causas potenciales .....  | 48 |
| Figura 40. Matriz Impacto control soluciones potenciales .....  | 48 |
| Figura 41. Causas raíz Herramienta 5 Porque .....   | 49 |
| Figura 42. Datos recopilados en MINITAB para Solución S1 .....  | 49 |
| Figura 43. Proceso de Molienda .....  | 49 |
| Figura 44. Especificaciones del molino actual .....   | 50 |
| Figura 45. Objetivos de mantenimiento correctivo a molino .....                                       | 50 |

## Índice de tablas

|  |    |
|--|----|
| Tabla 1. Verificación de causa C5 .....                        | 19 |
| Tabla 2. Verificación de causa C8 .....                        | 19 |
| Tabla 3. Factores y niveles por evaluar para solución S1 ..... | 21 |
| Tabla 4. Factores y niveles por evaluar en solución S3 .....   | 25 |
| Tabla 5. Costo de implementación de solución S1 .....          | 38 |
| Tabla 6. Costo de implementación de solución S2 .....          | 39 |
| Tabla 7. Costo de Implementación de solución S3 .....          | 39 |
| Tabla 8. Resumen costo de implementación de soluciones.....    | 40 |

# Capítulo 1

## 1.1. Introducción

El presente proyecto se centró en el estudio del cocimiento de cerveza industrial (Brewing) para una compañía multinacional de origen alemán de gran relevancia en el sector cervecero. El estudio abarcó un único centro de producción y distribución ubicado en Guayaquil, Ecuador. La compañía ofrece una variada gama de productos, entre los que destacaron las cervezas 100% malta, las cervezas de malta y arroz, las ediciones especiales y la producción de cerveza sin alcohol, siendo Ecuador la excepción en esta última categoría.

Para el estudio se midieron y analizaron indicadores de control para cada etapa productiva dentro del área de cocimiento (Brewhouse). El proceso de cocimiento es supervisado y monitoreado por el personal del área; este comprende una estación de control con un sistema automatizado que permite la supervisión de los procesos de molienda, maceración, filtración (Lautering), ebullición, Whirlpool y enfriamiento.

El proyecto buscó reducir las pérdidas de extracto de malta con el fin de obtener beneficios sociales, ambientales y económicos, estableciendo un estándar de eficiencia dentro del área Brewhouse. La implementación del proyecto se planteó como base para garantizar la mejora continua de la empresa, por lo que los hallazgos encontrados fueron sustentados, abordados, solucionados e implementados siguiendo la metodología DMAIC, la cual se aplicó a lo largo del estudio.

## 1.2 Descripción del Problema

Dentro del proceso de cocimiento, la etapa de filtración (Lautering) generó una pérdida de extracto en las denominadas "últimas aguas". Este residuo se originó durante el lavado final del lecho de afrecho dentro de la cuba filtro, provocando que una fracción del producto como extracto de mosto fuera derivada hacia los efluentes o aguas residuales.

Durante el periodo comprendido entre el 02 de agosto y el 24 de octubre, se registró una pérdida media de 101,30 kg de extracto de mosto en últimas aguas. Este volumen de merma se identificó en la producción de cervezas 100% malta, representando una pérdida neta del 1,50% del extracto total. La Figura 1 mostró la serie de tiempo del extracto perdido en últimas aguas, evidenciando el comportamiento variable del proceso.

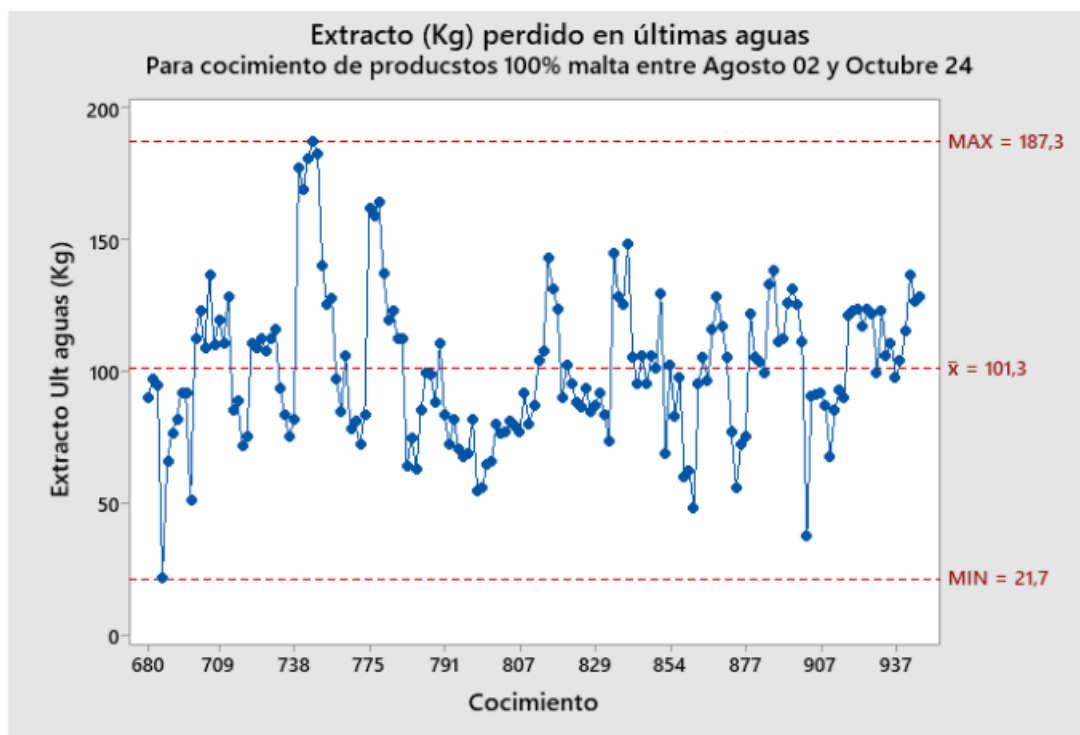


Figura 1. Serie de tiempo extracto perdido en últimas aguas

### 1.3 Justificación del Problema

La pérdida de extracto refleja la eficiencia actual del proceso, a escala industrial el 1,50% de pérdida refleja una cantidad considerable de granos de malta como materia prima que no se está aprovechando dentro del proceso.

Este margen de merma impacta económicamente ya que se está desaprovechando la oportunidad de reducir gastos de materia prima ya sea dentro de la etapa de filtración, que es donde se genera la merma, como en las siguientes etapas del proceso.

## 1.4. Objetivos

### 1.4.1 *Objetivo general*

Reducir la pérdida de extracto en las últimas aguas del proceso de cocimiento, de un promedio de 101,3 kg a un mínimo de 90 kg por cada unidad de cocimiento de producto 100% malta, en un periodo de 4 meses

### 1.4.2 *Objetivos específicos*

1. Recopilar datos cuantitativos y cualitativos del proceso de filtración de granos.
2. Evaluar las causas raíz del alto contenido de extracto mediante mediciones, pruebas experimentales y análisis estadístico.
3. Implementar acciones de mejora dirigidas a cada causa raíz para reducir el extracto en las últimas aguas.

## 1.5 Marco teórico

Para el presente proyecto de reducción de mermas en el proceso de cocimiento, primero se deben establecer los fundamentos y las bases teóricas acerca del proceso cervecero industrial, así como las herramientas estadísticas y de mejora continua que sustentan la metodología lean six sigma utilizada.

### 1.5.1. *Fundamentos del Proceso de Elaboración de Cerveza*

La producción de cerveza es un proceso que involucra la transformación física y química de diferentes materias primas. Goldammer (2022), en su tratado sobre procesos cerveceros modernos, señala que la eficiencia de la planta depende de la capacidad de extraer y convertir los azúcares del grano sin arrastrar compuestos que puedan afectar la estabilidad organoléptica del producto final.

Este proceso de elaboración de cerveza se estructura en las siguientes etapas:

1. **Área de cocimiento (Brewhouse):** Área donde la malta se transforma y recorre varios procesos a través de un conjunto de equipos de ámbito industrial. Dentro del área se

elabora el mosto, abarcando desde la mezcla de malta y agua hasta la cocción con lúpulo. Incluye comúnmente maceradores, ollas de cocción y equipos de filtrado, siendo esencial para definir el sabor antes de la fermentación.

2. **Sistema de producción de cocimientos (Brewmaxx):** El área de cocimiento cuenta con un sistema de producción totalmente automatizado, diseñado para el control y monitoreo integral de todas las etapas operativas. Este sistema permite la supervisión de cada etapa del proceso de cocimiento monitoreando los parámetros de producción en tiempo real y permitiendo establecer los parámetros a seguir de la receta de cada producto.
3. **Molienda (Milling):** El grano de malta se tritura para exponer el endospermo amiláceo. Investigaciones recientes de Pérez et al. (2023) destacan que una molienda optimizada debe preservar la integridad de la cáscara (husk), ya que esta servirá como el lecho filtrante natural indispensable para la etapa de separación posterior.
4. **Maceración (Mashing):** La harina se hidrata a temperaturas controladas (62-72°C) para activar enzimas. Estudios de Gómez y Smith (2021) detallan cómo el control preciso de estos descansos térmicos determina la "fermentabilidad" del mosto, definiendo el perfil de azúcares (maltosa vs. dextrinas).
5. **Filtración (Lautering):** Operación unitaria crítica donde se separa el mosto líquido de la fase sólida (afrecho). Es el foco central de este proyecto.
6. **Ebullición (Boiling):** Esterilización del mosto e isomerización de los ácidos alfa del lúpulo para generar amargor.
7. **Enfriamiento:** Eliminación de precipitados proteicos (Trub) y reducción de temperatura para la siembra de levadura.
8. **Fermentación:** Conversión biológica de azúcares en etanol y CO<sub>2</sub>

El flujo general del proceso se detalla en el mapa del área Brewhouse presentado en la **Figura 2.**

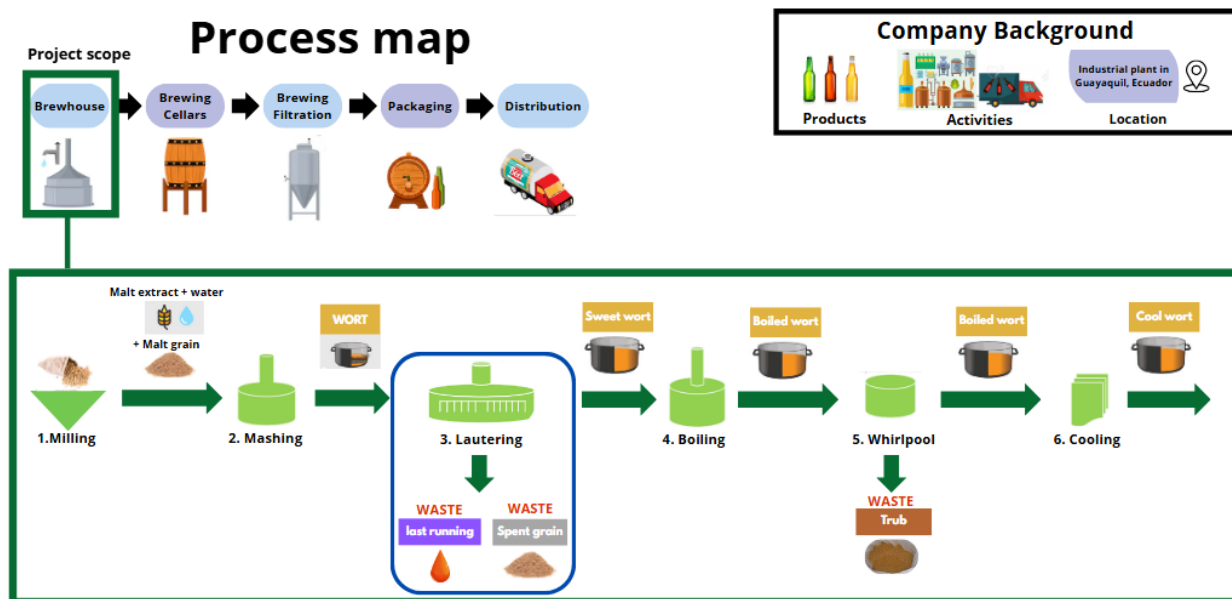


Figura 2. Mapa del proceso de área Brewhouse

### 1.5.2 Definiciones Técnicas Clave

- **Mosto (Wort):** Solución rica en carbohidratos, compuestos nitrogenados y minerales resultante de la extracción de la malta; sirve como sustrato para la actividad fermentativa de la levadura.
- **Agua de riego (Sparge wáter):** Se denomina agua de riego al recurso controlado (monitoreado por pH) que se añade al proceso de Lautering con el objetivo de mezclarse con el mosto. Su función principal es facilitar la filtración y dilución adecuada del mosto.
- **Mosto dulce (Sweet Wort):** Mosto diluido con mayor volumen y menor concentración de extracto de malta
- **Últimas aguas (Last running):** El agua residual de la filtración del segundo mosto, empleada para el lavado del afrecho, se almacena estratégicamente para ser reutilizada en los cocimientos sucesivos de un mismo lote. Este ciclo de recuperación se mantiene activo durante toda la producción, desechando el excedente final al drenaje únicamente al concluir el lote completo

- **Grados Plato (°P):** Unidad densimétrica que indica el porcentaje en peso de extracto en una solución. Un grado Plato equivale a 1 gramo de extracto por cada 100 gramos de solución y constituye el indicador clave de eficiencia.
- **Afrecho (Spent Grain):** Subproducto sólido compuesto por cáscaras y restos insolubles del endospermo. En el Lauter Tun, funciona como el medio filtrante principal.
- **Trub:** Precipitado formado por proteínas coaguladas y restos de lúpulo. Su presencia excesiva en fermentación puede provocar la aparición de “off-flavors” o sabores indeseados.

### ***1.5.3. Etapa de Filtración (Lautering)***

La investigación se centra en la etapa de Filtración, realizada comúnmente en una cuba filtro (Lauter Tun). Este equipo posee un falso fondo ranurado que permite retener los sólidos y dejar pasar el líquido.

El proceso se divide en dos fases:

1. **Recolección del Primer Mosto (*First Wort*):** Es el extracto de alta densidad (rico en azúcares) que fluye por gravedad tras la maceración.
2. **Lavado del Grano (*Sparging*):** Una vez drenado el primer mosto, una cantidad significativa de extracto permanece retenida en la cama de granos y en los intersticios del afrecho. Para recuperarlo, se rocía agua caliente (75°C - 78°C) sobre la cama.
3. **Filtración del segundo mosto:** proceso posterior a la filtración del primer mosto, donde se rocía agua caliente sobre el bagazo (cáscaras de malta presentes en mosto) para extraer los azúcares residuales. El proceso no solo emplea agua caliente (agua de riego), sino que integra activamente las últimas aguas (agua residual recolectada al final del Lautering) y el Trub (desecho generado en proceso posterior llamado Whirlpool)

provenientes de cocimientos anteriores. Esta práctica permite reincorporar azúcares residuales y materiales recuperados al flujo de producción actual.

A medida que avanza el lavado, la densidad del extracto (°P) disminuye y el pH tiende a incrementarse. La literatura técnica indica que existe un punto de equilibrio: continuar el lavado más allá de ese punto arrastra polifenoles y silicatos indeseables, mientras que detenerlo demasiado pronto (por ejemplo, >1.5 °P) implica descartar azúcares fermentables valiosos, generando una merma económica directa. El esquema de este proceso se observa en la Figura 3.

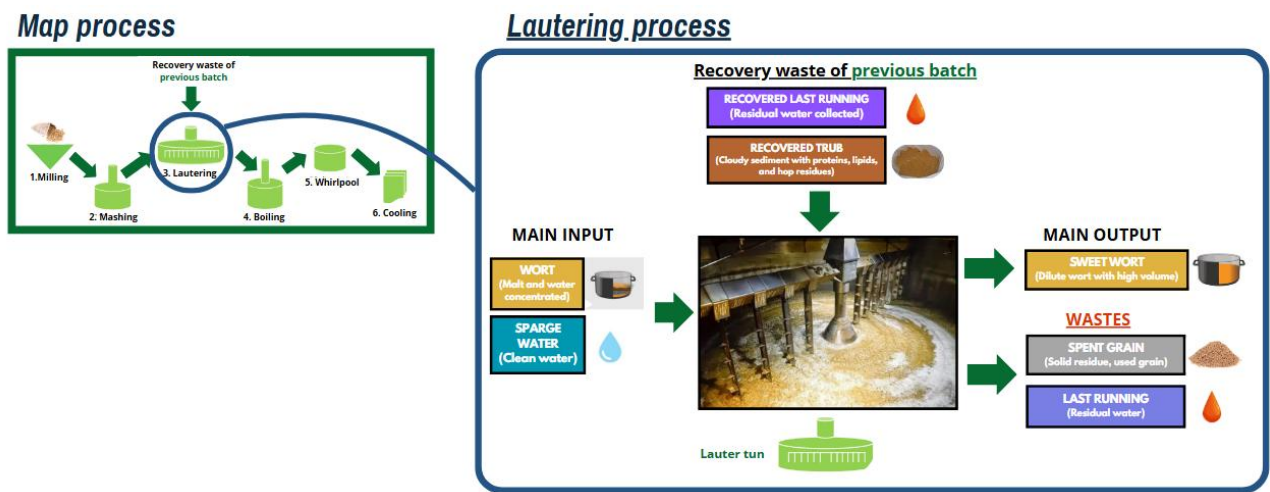


Figura 3. Proceso Lautering

#### 1.5.4 Cálculo de extracto

La fórmula utilizada por la empresa para determinar los kilogramos de extracto presente en el agua es la siguiente:

$$\text{Extracto (Kg)} = f(\text{EO}, \text{Vol}) \quad (1)$$

$$\text{Extracto (Kg)} = (0.99894 \cdot \text{EO} + 0.00377 \cdot \text{EO}^2 + 0.000016682 \cdot \text{EO}^3) \cdot \text{Vol} \quad (2)$$

Donde:

EO = Extracto Original en grados plato °P (Kg extracto/Kg del líquido a medir)

Vol = Volumen del líquido a medir en hl

### 1.5.5 Herramientas de Mejora (Lean Six Sigma)

La metodología del proyecto se basa en el ciclo de mejora continua y herramientas de diagnóstico Lean:

- **SIPOC (Supplier, Input, Process, Output, Customer):** Diagrama del proceso utilizado en la fase de Definir de la metodología DMAIC, que permite determinar a detalle los límites y elementos clave del proceso; detalla los responsables de proveer las entradas del proceso, las correspondientes entradas del proceso, descripción del proceso como tal, las correspondientes salidas del proceso, y por último los responsables de recibir las salidas del proceso.
- **5W2H (adaptado a 3W2H):** Herramienta de la fase de Definir de la metodología DMAIC que permite definir el problema de forma estructurada respondiendo las siguientes preguntas: *What* (Qué), *Where* (Dónde), *When* (Cuándo), *Who* (Quién), *Why* (Por qué), *How* (Cómo) y *How much* (Cuánto). En este proyecto se utiliza para acotar el alcance del problema de mermas.
- **Diagrama de Ishikawa:** Herramienta gráfica causal que permite clasificar posibles causas de un problema en categorías (6M: Método, Maquinaria, Mano de obra, Materiales, Medición y Medio ambiente). Facilita el análisis raíz y comprensión de las causas al desagregar el problema central en factores contribuyentes.
- **Matriz de Priorización (Control-Impacto):** Técnica de toma de decisiones que evalúa soluciones potenciales en dos dimensiones: el control que tiene el equipo sobre la variable y el impacto esperado en el resultado. Permite identificar "Quick Wins" (alto impacto, fácil implementación).

### ***1.5.6 Herramientas Estadísticas***

#### **Minitab:**

software de análisis estadístico potente y fácil de usar, diseñado para que empresas y profesionales analicen datos, descubran tendencias, predigan patrones y mejoren procesos mediante herramientas estadísticas y visualizaciones de datos (gráficos) dinámicas, siendo muy popular en metodologías como Six Sigma para la mejora continua y la toma de decisiones basadas en evidencia.

- **Prueba T de Student para Dos Muestras (Two-Sample t-Test):**

Prueba paramétrica utilizada para comparar las medias de dos poblaciones independientes. Se fundamenta en la hipótesis nula,

- **Análisis de Varianza de un Factor (One-Way ANOVA):** Método estadístico para comparar las medias de tres o más grupos. Descompone la varianza total en "varianza entre grupos" (efecto del factor) y "varianza dentro de los grupos" (error). A lo largo del proyecto se utiliza para Evaluar si un factor de estratificación (ej. Marca, Turno) tiene un efecto significativo sobre la variable de respuesta.
- **Prueba de Normalidad (Anderson-Darling):** Evalúa si un conjunto de datos proviene de una distribución normal teórica. Un valor-P < 0.05 indica que los datos no son normales, lo cual determina si se deben usar métodos paramétricos o análisis de capacidad no normal.
- **Regresión Lineal Simple:** Modela la relación entre una variable dependiente con una o varias variables independientes mediante la ecuación lineal  $Y = mX + b$ , lo que permite predecir el comportamiento de la variable dependiente en función de las variables de entrada, además de determinar la significancia de forma individual de cada variable de entrada con la variable dependiente.

- **Gráfica de Control I-MR:** Herramienta de Control Estadístico de Procesos (SPC) para datos individuales. La gráfica I monitorea la media del proceso y la gráfica MR (Rango Móvil) monitorea la variabilidad entre mediciones consecutivas. Es ideal para procesos por lotes (batch) como el cocimiento.
- **Análisis de Capacidad Binomial:** Utilizado cuando la variable de interés es un atributo (Defectuoso / No Defectuoso). Estima la capacidad del proceso calculando la proporción de defectos (grados p) y su estabilidad en el tiempo, basándose en la distribución binomial.
- El **Diseño de Experimentos (DOE)** es una herramienta estadística fundamental dentro de la fase "Analizar" e "Implantar" de la metodología **Lean Six Sigma**. Según **Montgomery (2020)**, el DOE se define como una prueba o serie de pruebas en las que se realizan cambios deliberados en las variables de entrada de un proceso para observar e identificar las razones de los cambios en la variable de respuesta

## Capítulo 2

### 2. Metodología.

#### 2.1. Recolección de datos

El área de Brewhouse cuenta con el sistema BRWM, el cual se encarga de registrar y monitorear en tiempo real todos los parámetros a lo largo del proceso desde molienda hasta enfriamiento, dicho sistema también se encuentra configurando de forma que se cumplan de forma automatizada los parámetros de forma que siempre se cumpla la receta estándar establecida por la empresa.

Primero se identificó que variables son aquellas están relacionadas con nuestra variable dependiente y su impacto dentro del proceso:

- **Volumen de afrecho (ml):** indica la calidad del afrecho en el proceso de filtración
- **Extracto del 1er mosto (°P):** la densidad o cantidad de extracto de mosto en Kg diluido en el total de líquido del 1er mosto en Kg.
- **Volumen del 1er mosto (ml)**
- **Número de cortes (#):** Indica si el proceso de filtración varía debido a paros no programados en proceso de filtración
- **Tiempo total de filtración (min):** Indica si el proceso cumple con el rendimiento establecido por la empresa
- **Volumen de últimas aguas (hl):** Volumen de agua residual denominado ultimas aguas generado en la etapa de filtración (Lautering)
- **Extracto de últimas aguas (°P):** la densidad o cantidad de extracto de mosto en Kg diluido en el total del líquido de ultimas aguas en Kg

El registro de autocontrol de estas variables se muestra en la **Figura 4**.

|     | A                   | B            | C      | D        | E                  | F                         | G                  | AK               | AL                       | AM                        | AN                       | AO                | AP                   | AQ                       | AR                    | AS                             | AT                      | AU                            | AV                        |
|-----|---------------------|--------------|--------|----------|--------------------|---------------------------|--------------------|------------------|--------------------------|---------------------------|--------------------------|-------------------|----------------------|--------------------------|-----------------------|--------------------------------|-------------------------|-------------------------------|---------------------------|
|     | Fecha de Producción | # Cocimiento | Tanque | Marca    | Hora Bajada Maltas | Hora Termina Enfriamiento | Total Brewing Time | Galatonin o (gr) | Sulfato de Zinc (gramos) | Volumen agua Olla de Agua | Volumen Agua Olla Maltas | pH Olla de Maltas | Test de Yodo (OK/NO) | Volumen del Primer Mosto | Extracto Primer Mosto | Volumen últimos aguas Generado | YD Mosto Débil Generado | Tiempo Total Filtración (min) | Cortes durante el proceso |
| 793 | 3-sept              | 783          | 7      | Amstel   | 1:15               | 8:31                      | 436                |                  |                          |                           | 210                      | 5,54              | ok                   | 160                      | 18                    | 40                             | 1,6                     | 96                            | 3                         |
| 795 | 3-sept              | 784          | 7      | Amstel   | 5:20               | 13:18                     | 478                |                  |                          |                           | 210                      | 5,57              | ok                   | 160                      | 18                    | 44                             | 1,7                     | 110                           | 3                         |
| 797 | 3-sept              | 785          | 7      | Amstel   | 9:42               | 16:52                     | 430                |                  |                          |                           | 210                      | 5,52              | ok                   | 160                      | 18,5                  | 42                             | 1,5                     | 94                            | 2                         |
| 798 | 3-sept              | 786          | 7      | Amstel   | 13:30              | 20:27                     | 417                |                  |                          |                           | 210                      | 5,5               | ok                   | 160                      | 18,4                  | 50                             | 1,7                     | 92                            | 3                         |
| 799 | 3-sept              | 787          | 7      | Amstel   | 18:17              | 1:00                      | 403                |                  |                          |                           | 210                      | 5,53              | ok                   | 160                      | 18,5                  | 62                             | 1,6                     | 95                            | 3                         |
| 800 | 3-sept              | 788          | 7      | Amstel   | 22:02              | 5:00                      | 418                |                  |                          |                           | 210                      | 5,54              | ok                   | 160                      | 18,9                  | 58                             | 1,7                     | 94                            | 3                         |
| 801 | 4-sept              | 789          | 7      | Amstel   | 2:02               | 8:48                      | 406                |                  |                          |                           | 210                      | 5,57              | ok                   | 160                      | 18,7                  | 55                             | 1,6                     | 91                            | 3                         |
| 802 | 4-sept              | 790          | 1      | Amstel   | 6:10               | 13:04                     | 414                |                  | 800                      |                           | 210                      | 5,5               | ok                   | 160                      | 18,8                  | 65                             | 1,7                     | 88                            | 3                         |
| 803 | 4-sept              | 791          | 1      | Amstel   | 10:36              | 17:57                     | 441                |                  |                          |                           | 210                      | 5,52              | ok                   | 160                      | 18,2                  | 52                             | 1,6                     | 100                           | 5                         |
| 804 | 4-sept              | 792          | 1      | Amstel   | 14:37              | 21:54                     | 437                |                  |                          |                           | 210                      | 5,5               | ok                   | 160                      | 18,6                  | 45                             | 1,6                     | 106                           | 5                         |
| 805 | 4-sept              | 793          | 1      | Amstel   | 18:30              | 1:35                      | 425                |                  |                          |                           | 210                      | 5,54              | ok                   | 160                      | 18,5                  | 48                             | 1,7                     | 98                            | 3                         |
| 806 | 4-sept              | 794          | 1      | Amstel   | 22:30              | 5:40                      | 430                |                  |                          |                           | 210                      | 5,57              | ok                   | 160                      | 18,9                  | 44                             | 1,6                     | 95                            | 3                         |
| 807 | 5-sept              | 795          | 1      | Amstel   | 2:17               | 9:53                      | 456                |                  | 1600                     |                           | 210                      | 5,54              | ok                   | 160                      | 18,4                  | 45                             | 1,5                     | 96                            | 2                         |
| 808 | 5-sept              | 796          | 1      | Amstel   | 6:30               | 13:44                     | 434                |                  |                          |                           | 210                      | 5,61              | ok                   | 160                      | 18,4                  | 46                             | 1,5                     | 88                            | 2                         |
| 809 | 8-sept              | 797          | 5      | Heineken | 17:30              | 1:32                      | 482                |                  | 400                      |                           | 225                      | 5,59              | ok                   | 140                      | 19,4                  | 48                             | 1,7                     | 93                            | 3                         |
| 810 | 9-sept              | 798          | 5      | Heineken | 21:30              | 4:34                      | 424                |                  |                          |                           | 225                      | 5,51              | ok                   | 140                      | 19,3                  | 32                             | 1,7                     | 87                            | 3                         |
| 811 | 9-sept              | 799          | 5      | Heineken | 1:30               | 8:50                      | 440                |                  |                          |                           | 225                      | 5,48              | ok                   | 140                      | 19,5                  | 35                             | 1,6                     | 90                            | 3                         |
| 812 | 9-sept              | 800          | 5      | Heineken | 5:30               | 13:00                     | 450                |                  |                          |                           | 225                      | 5,54              | ok                   | 140                      | 19,6                  | 38                             | 1,7                     | 87                            | 3                         |
| 813 | 9-sept              | 801          | 6      | Heineken | 9:30               | 16:54                     | 444                |                  | 400                      |                           | 225                      | 5,48              | ok                   | 140                      | 19,7                  | 41                             | 1,6                     | 89                            | 3                         |
| 814 | 9-sept              | 802          | 6      | Heineken | 13:30              | 21:18                     | 468                |                  |                          |                           | 225                      | 5,5               | ok                   | 140                      | 21                    | 47                             | 1,7                     | 87                            | 4                         |
| 815 | 9-sept              | 803          | 6      | Heineken | 17:40              | 1:20                      | 460                |                  |                          |                           | 225                      | 5,4               | ok                   | 140                      | 20,1                  | 45                             | 1,7                     | 84                            | 3                         |
| 816 | 9-sept              | 804          | 6      | Heineken | 21:49              | 5:21                      | 452                |                  |                          |                           | 225                      | 5,56              | ok                   | 140                      | 19,7                  | 48                             | 1,6                     | 85                            | 3                         |
| 817 | 10-sept             | 805          | 3      | Heineken | 1:49               | 9:15                      | 446                |                  | 400                      |                           | 225                      | 5,5               | ok                   | 140                      | 19,8                  | 45                             | 1,8                     | 95                            | 2                         |
| 818 | 10-sept             | 806          | 3      | Heineken | 7:09               | 15:00                     | 471                |                  |                          |                           | 225                      | 5,49              | ok                   | 140                      | 20,2                  | 44                             | 1,8                     | 93                            | 5                         |
| 819 | 10-sept             | 807          | 3      | Heineken | 11:00              | 17:59                     | 419                |                  |                          |                           | 225                      | 5,55              | ok                   | 140                      | 20,1                  | 48                             | 1,6                     | 97                            | 5                         |
| 820 | 10-sept             | 808          | 3      | Heineken | 15:00              | 21:54                     | 414                |                  |                          |                           | 225                      | 5,54              | ok                   | 140                      | 19,9                  | 48                             | 1,9                     | 93                            | 5                         |
| 821 | 10-sept             | 809          | 4      | Heineken | 19:31              | 2:57                      | 446                |                  | 400                      |                           | 225                      | 5,5               | ok                   | 140                      | 20,9                  | 50                             | 1,6                     | 89                            | 2                         |
| 822 | 10-sept             | 810          | 4      | Heineken | 23:30              | 7:31                      | 481                |                  |                          |                           | 225                      | 5,52              | ok                   | 140                      | 20,8                  | 51                             | 1,7                     | 95                            | 3                         |
| 823 | 11-sept             | 811          | 4      | Heineken | 3:30               | 11:05                     | 455                |                  |                          |                           | 225                      | 5,57              | ok                   | 140                      | 20,4                  | 65                             | 1,6                     | 97                            | 3                         |
| 824 | 11-sept             | 812          | 4      | Heineken | 7:30               | 15:20                     | 470                |                  |                          |                           | 225                      | 5,54              | ok                   | 140                      | 20,6                  | 63                             | 1,7                     | 89                            | 3                         |
| 825 | 11-sept             | 813          | 8      | Heineken | 22:35              | 6:05                      | 450                |                  | 800                      |                           | 225                      | 5,51              | ok                   | 140                      | 20,8                  | 79                             | 1,8                     | 82                            | 2                         |
| 826 | 12-sept             | 814          | 8      | Heineken | 2:30               | 9:50                      | 440                |                  |                          |                           | 225                      | 5,53              | ok                   | 140                      | 20,5                  | 77                             | 1,7                     | 89                            | 3                         |
| 827 | 12-sept             | 815          | 8      | Heineken | 6:30               | 13:50                     | 440                |                  |                          |                           | 225                      | 5,52              | ok                   | 140                      | 20,6                  | 77                             | 1,6                     | 88                            | 3                         |
| 828 | 15-sept             | 816          | 4      | Amstel   | 19:00              | 2:19                      | 439                | 600              | 400                      |                           | 200                      | 5,58              | ok                   | 165                      | 18                    | 56                             | 1,6                     | 97                            | 2                         |
| 829 | 16-sept             | 817          | 4      | Amstel   | 23:00              | 7:40                      | 500                | 600              |                          |                           | 200                      | 5,5               | ok                   | 165                      | 17,4                  | 60                             | 1,7                     | 105                           | 2                         |

Figura 4. Registro Autocontrol 2025 para el área de cocimiento

## 2.2. Verificación de datos

Para garantizar la integridad de la información, se realizó una validación de los datos mediante el levantamiento presencial de 15 muestras, las cuales fueron contrastadas con el registro histórico de la compañía con 68 muestras. Para determinar si existían diferencias significativas entre la fuente histórica y la observada, se aplicó una prueba t de dos muestras (2-Sample t-Test) y se plantearon las siguientes hipótesis para cada variable:

- Hipótesis Nula: La media de la variable observada es igual a la histórica
- Hipótesis alternativa: La media de la variable observada no es igual a la histórica

El análisis estadístico, realizado con un nivel de confianza del 95% (Alpha= 0.05), arrojó evidencia suficiente para no rechazar la hipótesis nula en todas las variables analizadas

| Data                       | Company Data |        |                    | Observed Data |       |                    | Two-Sample t-Test |  |                                 |
|----------------------------|--------------|--------|--------------------|---------------|-------|--------------------|-------------------|--|---------------------------------|
|                            | # Samples    | Mean   | Standard Deviation | # Samples     | Mean  | Standard Deviation | P value           | Conclusion   | Reliability                     |
| Spent grain volume (mL)    | 68           | 397,5  | 92,7               | 15            | 445   | 88,7               | <b>0,076</b>      | There are no statistically significant differences | The company's data is reliable. |
| 1st Wort volume (hl)       | 68           | 161,2  | 22,2               | 15            | 173,3 | 26,5               | <b>0,139</b>      | There are no statistically significant differences | The company's data is reliable. |
| 1st Wort extract (°P)      | 68           | 19,578 | 0,996              | 15            | 19,9  | 0,908              | <b>0,235</b>      | There are no statistically significant differences | The company's data is reliable. |
| Cut count (#)              | 68           | 2,382  | 0,773              | 15            | 2,8   | 0,775              | <b>0,073</b>      | There are no statistically significant differences | The company's data is reliable. |
| Total lautering time (min) | 68           | 92,07  | 8,05               | 15            | 90,6  | 4,93               | <b>0,364</b>      | There are no statistically significant differences | The company's data is reliable. |
| Last running volume (hl)   | 68           | 66,9   | 14,1               | 15            | 53,6  | 17,3               | <b>0,524</b>      | There are no statistically significant differences | The company's data is reliable. |
| Last running extract (°P)  | 68           | 1,59   | 0,117              | 15            | 1,61  | 0,114              | <b>0,604</b>      | There are no statistically significant differences | The company's data is reliable. |

Figura 5. Verificación de datos prueba T

Como se observa en la **Figura 5**, los valores p obtenidos fueron consistentemente altos y mayores al Alpha de 0.05, por lo que no se rechaza la hipótesis nula y se concluye que los datos históricos que registra la empresa son confiables y pueden ser utilizados para análisis estadístico.

### 2.3. Análisis de capacidad

Para determinar la condición base del proceso, se llevó a cabo un análisis de capacidad sobre la variable objetivo: kilogramos de extracto perdido en últimas aguas.

Previo al cálculo, se realizó una prueba de normalidad con un nivel de significancia Alpha = 0.05, obteniendo un valor p de 0.030. Al ser un valor p menor a Alpha, se confirmó que la variable posee una distribución no normal, por lo cual el análisis de capacidad se ejecutó bajo un modelo de distribución Weibull.

El análisis demuestra que el proceso es estadísticamente incapaz de cumplir con el límite superior establecido en el proyecto de 90 kg de extracto perdido en últimas aguas presentando una media real de 101.275 kg. El rendimiento observado revela un nivel de defectos de 636,363.64 partes por millón (PPM) por encima del límite permitido, lo que significa que aproximadamente el 63.6% de los cocimientos exceden el límite de pérdida esperado, tal como se aprecia en el análisis de capacidad de la **Figura 6**.

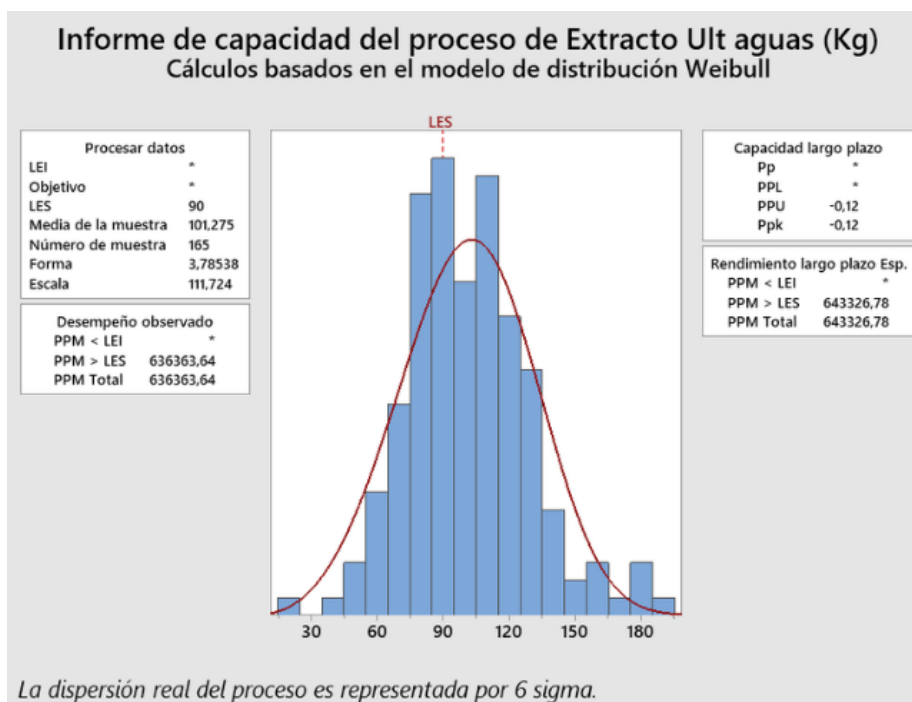


Figura 6. Análisis de capacidad kilogramos de extracto perdido en ultimas aguas

## 2.4. Estratificación

Tras determinar la necesidad de intervenir en el proceso de cocimiento, se enlistaron los posibles factores de estratificación con el fin de identificar y separar las fuentes de variación presente en la etapa de filtración, proceso donde se generan las ultimas aguas:

- **Por tipo de marca 100% malta:** segmentado en Producto 1, 2 y 3.
- **Por tipo de operador encargado del proceso de cocimiento:** 3 operadores diferentes asignados al proceso
- **Por turno de trabajo:** análisis por turnos (mañana, tarde y noche).

Se aplicó un análisis ANOVA para corroborar si los factores de estratificación son estadísticamente significantes o si son irrelevantes para la pérdida de kilogramos de extracto en ultimas aguas. El análisis plantea las siguientes hipótesis:

- Hipótesis Nula: Las medias de los grupos son iguales
- Hipótesis Alternativa: Las medias de los grupos no son iguales

El análisis de medias ANOVA determinó que los factores "Operador" ( $p = 0.054$ ) y "Turno" ( $p = 0.641$ ) no mostraron significancia estadística ya que el valor  $p$  de ambos es mayor al nivel de confianza establecido siendo este un  $\text{Alpha} = 0.05$  lo que no se rechaza la hipótesis nula y no se descartan que dichos factores sean relevantes para la variable objetivo. Sin embargo, el análisis determinó un valor un valor  $p$  ( $p = 0,008$ ) para el factor de "Marca" por lo que se rechaza la hipótesis nula y se considera al factor "Marca" como significativo para nuestra variable objetivo. La gráfica de intervalos de la **Figura 7** ilustra esta diferencia significativa entre marcas.

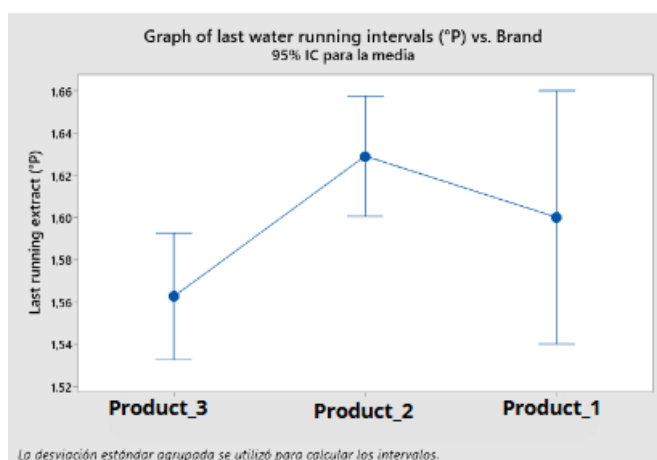


Figura 7. Gráfica de intervalos análisis ANOVA estratificación por Marca

El diagnóstico determinó que los **Productos 1 y 2** presentan altos niveles de pérdida promedio de 114,95 kg y 101,28 kg de extracto respectivamente. Debido a los altos valores, el análisis de causas raíz se concentrará exclusivamente en identificar las posibles causas o factores que afectan la producción de ambas marcas.

## 2.5. Posibles causas

Para identificar el origen del problema se llevaron a cabo entrevistas con el personal operativo y el Maestro Cervecerero del área de cocimiento. Las causas identificadas se categorizaron mediante un Diagrama de Ishikawa, resultando en un total de 9 causas

posibles. Posteriormente, mediante un análisis de Pareto (**Figura 8**), se priorizaron aquellas causas que representan el 80% de la incidencia según el criterio experto del personal.

| Nivel de impacto | Sin impacto | Bajo | Medio | Alto |
|------------------|-------------|------|-------|------|
|                  | 0           | 1    | 3     | 9    |

Figura 8. Nivel de impacto para causas potenciales

| Código | Cauaas potenciales   | Maestro cervecero | Operador de comiento_1 | Operador de comiento_2 | Operador de comiento_3 | Total |
|--------|--|-------------------|------------------------|------------------------|------------------------|-------|
| C1     | El flujo actual de agua de lavado no garantiza el enjuague óptimo del grano.           | 9                 | 3                      | 9                      | 9                      | 30    |
| C2     | La secuencia de materiales en el proceso de lautering (filtración) no es óptima.       | 9                 | 3                      | 9                      | 9                      | 30    |
| C3     | No se considera la temperatura al tomar muestras de las últimas aguas.                 | 1                 | 1                      | 3                      | 1                      | 6     |
| C4     | Generación de un alto volumen (hl) de últimas aguas.                                   | 3                 | 9                      | 9                      | 9                      | 30    |
| C5     | El volumen de agua usado en la filtración del segundo mosto no es óptimo.              | 9                 | 9                      | 3                      | 9                      | 30    |
| C6     | Collector de filtración tapado   | 3                 | 9                      | 3                      | 3                      | 18    |
| C7     | Temperaturas irregulares en agua de riego  | 9                 | 3                      | 3                      | 9                      | 24    |
| C8     | La recuperación de extracto de desperdicios anteriores reduce la calidad de filtración | 9                 | 9                      | 9                      | 9                      | 36    |
| C9     | El extracto de primer mosto a filtrar no es óptimo                                     | 3                 | 9                      | 3                      | 9                      | 24    |

Figura 9. Ponderación para causas potenciales

Finalmente, se aplicó una matriz de impacto-control (**Figura 9**) para descartar aquellas causas con bajo impacto o alta complejidad de validar, resultando en 4 causas potenciales críticas las cuales se detalla la verificación de cada una en el siguiente plan de verificación de la **Figura 10**:

| Plan de verificación - Causas potenciales para alta pérdida de kg de extracto |   |   |                              |           |            |  |                      |
|---|---|---|------------------------------|-----------|------------|--|----------------------|
| Códigop   | Que   |   | Donde                        | Cuando    |            | Como   | Quien                |
|   | Causa   | Impacto en la variable objetivo   |                              | Inicio    | Fin        |  |                      |
| C2  | La secuencia de entrada entre el agua de lavado y la recuperación de extracto no es óptima. | mayor concentración en diferentes etapas de filtración, causando un mayor extracto residual y un volumen más alto en las últimas aguas.   | Autocontroles. xlsx          | 2/10/2025 | 20/11/2025 | Comparar cambios históricos respecto a la entrada de las últimas aguas y el agua de lavado en el proceso.                                  | Líderes del proyecto |
| C4  | Alto volumen (hl) generado de las últimas aguas.  | El volumen es el factor más significativo para la pérdida de extracto, mayor incluso que la concentración de las últimas aguas.   | Autocontroles. xlsx          | 2/10/2025 | 20/11/2025 | Un modelo de regresión para evaluar si el volumen de las últimas aguas es un factor significativo, mayor que la concentración              | Líderes del proyecto |
| C5  | El volumen de agua utilizado en la filtración del segundo mosto no es óptimo.               | Cuanta más agua se añade durante la filtración del segundo mosto, mayor es la pérdida de extracto (kg) en las últimas aguas.  | sistema Brewhouse (Brewmaxx) | 2/10/2025 | 20/11/2025 | Comparar los volúmenes más bajos y más altos de agua de lavado y últimas aguas contra los kilogramos de extracto perdido.                  | Líderes del proyecto |
| C8  | La recuperación de residuos de lotes anteriores disminuye la calidad de la filtración       | El reciclaje de las últimas aguas y el turbio (trub) de cocimientos anteriores aumenta la concentración del mosto y el volumen en las últimas aguas, lo que incrementa la pérdida total de extracto (kg). | Autocontroles. xlsx          | 2/10/2025 | 20/11/2025 | Comparación de la pérdida de extracto (kg) entre cocimientos con agua de lavado y aquellos que utilizan últimas aguas y turbio reciclados. | Líderes del proyecto |

Figura 10. Plan de verificación de causas

### 2.5.1. Verificación de causas

Siguiendo el plan de validación de causas, se obtuvieron las siguientes pruebas:

- **Causa C2: La secuencia de entrada y recuperación de extracto no es óptima**

A partir del 22 de septiembre de 2025, se implementó una modificación a la etapa de filtración el cual consiste en recuperar el Trub del cocimiento anterior y añadirlo a la filtración del segundo mosto. Al contrastar los resultados con el histórico previo, se determinó que esta práctica incrementó la pérdida media de extracto en 7,3 kg por cocimiento para los Productos 1 y 2, comportamiento visible en la gráfica de control de la **Figura 11**.

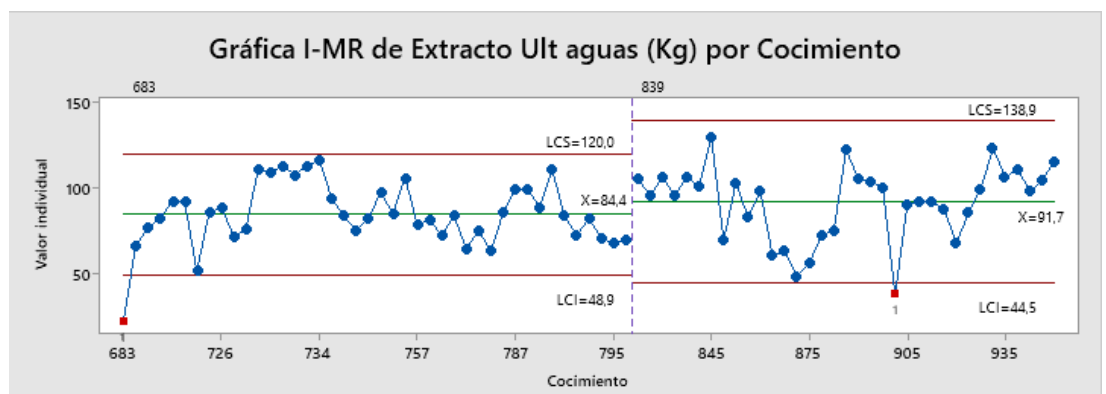


Figura 11, Gráfica de control de kg de extracto perdido en últimas aguas.

- **Causa C4: Alto volumen (hl) generado de las ultimas aguas**

A través de un análisis de regresión lineal, se demostró que el volumen de las últimas aguas (hl) tiene un impacto más significativo que la concentración en la pérdida total de extracto. Si bien ambas variables son estadísticamente significativas, el modelo confirma que la reducción del volumen de ultimas aguas es la medida más efectiva para mitigar la pérdida de extracto, ya que existe una relación directamente proporcional: a mayor volumen de agua, mayores son los kilogramos de extracto perdidos. Esto se evidencia en la gráfica de dispersión de la **Figura 12** y el diagrama de Pareto de la **Figura 13**.

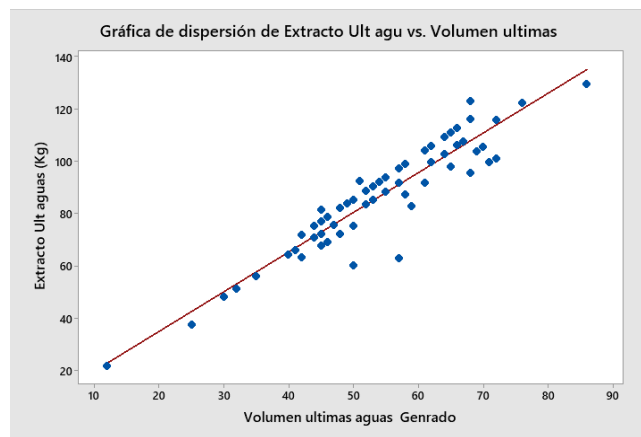


Figura 12. Gráfica de dispersión extracto perdido (Kg) en últimas aguas vs volumen de ultimas aguas (hl)

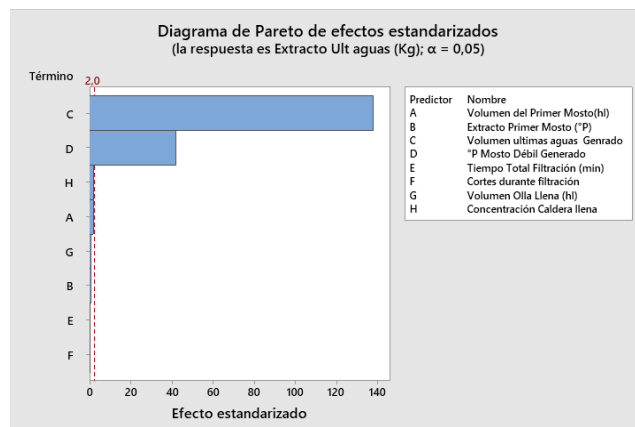


Figura 13. Regresión lineal: Diagrama de Pareto para kilogramos de extracto de últimas aguas

- **Causa C5: El volumen de agua utilizado en la filtración no es óptimo**

Se compararon dos cocimientos, los cuales difirieron únicamente en la cantidad de agua de riego utilizada en la etapa de filtración del segundo mosto. Se observó que un cocimiento con 280 hl de agua de riego generó una mayor pérdida de extracto en comparación con uno de 200 hl. Estos resultados, detallados en la **Tabla 1**, validaron que, a menor volumen de agua utilizado, se obtuvo una reducción en los kilogramos de extracto desperdiciados....

Tabla 1. Verificación de causa C5

| <b>Cocimiento #</b> | <b>Volumen de agua en filtración de segundo mosto</b> | <b>Media de extracto perdido (Kg)</b> |
|---------------------|---|---------------------------------------|
| 858                 | 280 hl  | 62.89 Kg                              |
| 859                 | 200 hl  | 48.24 kg                              |

- **Causa C8: La recuperación de residuos de lotes anteriores disminuye la calidad de filtración**

En los primeros cocimientos de arranque, donde se utilizó exclusivamente agua de riego limpia sin reciclar "últimas aguas" ni Trub de lotes anteriores, la pérdida media de extracto fue de 70,82 kg. En contraste, los cocimientos normales que integraron la recuperación de extracto de lotes previos registraron una pérdida media superior, la cual ascendió a 90,00 kg. Esta comparativa se presentó en la **Tabla 2**, evidenciando el impacto de la recirculación en la merma final del proceso.

Tabla 2. Verificación de causa C8

| <b>Tipo de cocimiento</b> | <b>Agua utilizada en filtración de segundo mosto</b> | <b>Media de extracto perdido (Kg)</b> |
|---------------------------|--|---------------------------------------|
| Arranque                  | Agua de riego,<br><br>Agua de riego +                | 70.82 Kg                              |

|        |   |          |
|--------|---|----------|
| Normal | últimas aguas (recuperado) +<br>Trub (recuperado) | 90.00 Kg |
|--------|---|----------|

## 2.6. Implementación de soluciones

Tras la validación de las causas potenciales, se aplicó la metodología de los 5 Porqués para profundizar en cada hallazgo y determinar su causa raíz. Este análisis permitió proponer una serie de soluciones orientadas a mitigar las pérdidas de extracto detectadas en los productos 1 y 2, resumidas en la **Figura 14**.

| Code | Potential Cause   | Root Cause   | Possible Solutions  |
|------|---|--|---|
| C2   | La secuencia de materiales en el proceso de filtración (lautering) no es óptima.    | No se ha determinado el orden óptimo que ayude a reducir el extracto en las últimas aguas.                                   | <b>S1: Diseño experimental de un solo factor (ANOVA)</b> para determinar la secuencia óptima, incluyendo una variante sin recuperación de trub.   |
| C8   | La recuperación de residuos de lotes previos disminuye la calidad de la filtración. | Se mantiene la creencia de que recuperar estos residuos mejora la eficiencia de la filtración.                               |   |
| C4   | Generación de un alto volumen (hl) de últimas aguas.                                | El molino actual no garantiza una calidad de granulometría consistente.  | <b>S2:</b> Justificar la inversión en un <b>nuevo Molino</b> mediante un análisis de calidad de molienda.<br><b>S3:</b> Realizar un <b>mantenimiento correctivo/preventivo (upholding) al molino</b> para garantizar los estándares de calidad. |
| C5   | El volumen de agua utilizado en la filtración del segundo mosto no es óptimo.       | No existe un estudio para identificar los parámetros óptimos de consumo de agua en relación con la pérdida de extracto (kg). | <b>S4: Diseño experimental factorial</b> para determinar los parámetros óptimos de consumo de agua.<br><b>S5:</b> Implementar un <b>modelo lineal</b> para determinar el volumen óptimo a añadir en la filtración.                              |

Figura 14. Posibles soluciones por causa raíz

Posteriormente, las propuestas fueron evaluadas mediante una matriz de impacto-esfuerzo, descartando aquellas con baja viabilidad técnica o beneficios limitados. Como resultado, se seleccionaron las 3 soluciones finales a implementar:

### 2.6.1. S1: Optimización de la Secuencia de Filtración)

Con el objetivo de identificar la secuencia de ingreso de materia prima y recuperación de extracto que minimice la pérdida en kilogramos, se implementó un diseño de experimentos (DOE) de un solo factor. Este análisis se centra específicamente en el

manejo del Trub y las últimas aguas del cocimiento anterior durante la etapa de filtración, siguiendo el diseño experimental detallado en la **Figura 15**.

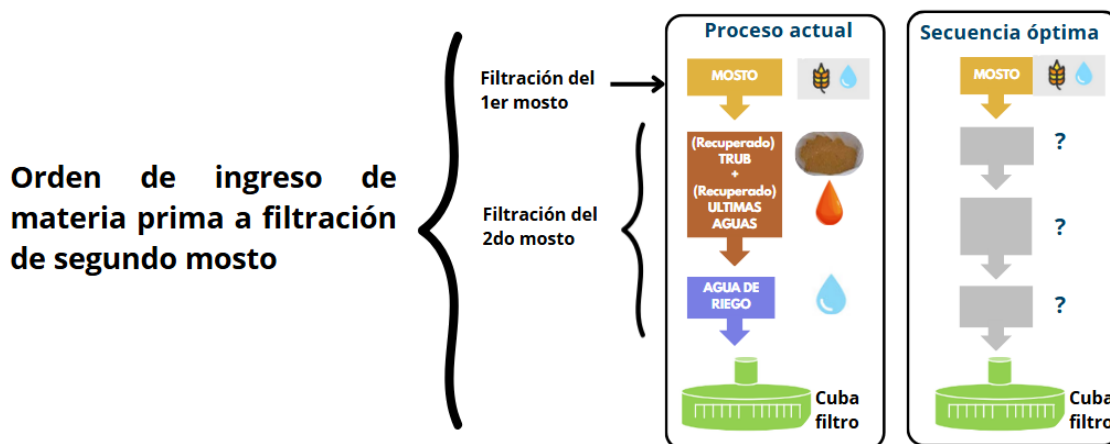


Figura 15. Solución-S1: Diseño de experimentos de un solo factor (ANOVA)

El experimento evalúa cuatro niveles (Secuencias A, B, C y D) detallados en la **Figura 16**, donde el único factor variable es el orden de ingreso de los materiales. Para fortalecer la validez estadística, se determinó realizar una réplica por cada secuencia, resultando en un total de 8 pruebas (2 ejecuciones por cada nivel o secuencia), para al final de cada secuencia medir los kilogramos de extracto perdido como variable de respuesta. Se puede observar el factor y los niveles a evaluar en la **Tabla 3** a continuación:

Tabla 3. Factores y niveles por evaluar para solución S1

| Factor  | Tipo de variable | Nivel       |             |             |             |
|---|------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
|   |                  | 1           | 2           | 3           | 4           |
| Secuencia de entrada a etapa de filtración de 2do mosto | Catagórico       | Secuencia A | Secuencia B | Secuencia C | Secuencia D |

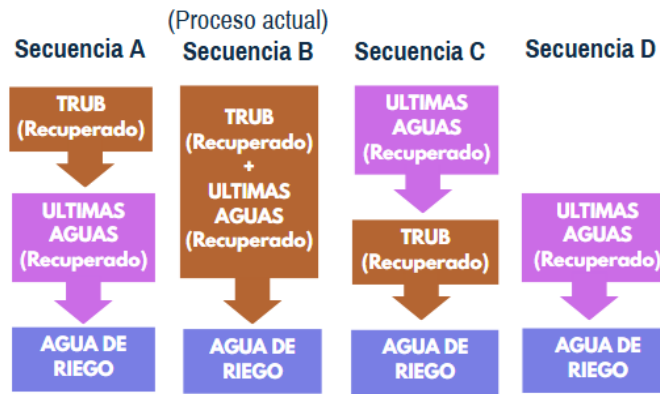


Figura 16. Detalle de niveles a evaluar en solución S1

Para garantizar la validez estadística de los resultados y aislar el efecto de la secuencia, se establecieron variables de bloqueo, manteniendo constantes los factores externos que no son objeto de estudio durante las pruebas, estableciendo los siguientes factores de bloqueo:

- **Calidad de molienda:** Se garantizó que la integridad de la cáscara de malta post-molienda fuera idéntica en todas las muestras utilizadas para la filtración.
- **Estandarización de Producto:** Todas las pruebas se ejecutaron exclusivamente en la producción del Producto 2, por tener mayor disponibilidad de producción para realizar las pruebas.
- **Concentración del mosto:** Se mantuvo una concentración constante en el mosto que ingresa a filtración, con una tolerancia máxima de variación de  $\pm 1$  grado Plato ( $^{\circ}$ P) entre cada prueba para evitar sesgos en los resultados.

Para el registro sistemático de los datos experimentales, se contó con la colaboración directa del personal operativo del área de cocimiento. Con el fin de asegurar la recolección de datos y mantener las variables de bloqueo establecidas durante las 8 corridas del experimento, se diseñó e implementó un formato estandarizado de recolección de datos (**Figura 17**).

**Observaciones:**

- **Granulometría** debe ser la misma para cada prueba (o conservar una **variación de  $\pm 50$  ml**)
- El **extracto de 1er mosto** debe ser el mismo para cada prueba (o conservar una **variación de  $\pm 1$  °P**)
- No es necesario llenar las pruebas en orden, pueden realizarse de forma **aleatoria**

| DATOS TRAZABILIDAD |            |              |             | VALORES A MANTENER CONSTANTES DURANTE PRUEBAS |                         | VALORES POR CAMBIAR                    | VALOR DE RESPUESTA    |
|--------------------|------------|--------------|-------------|---|-------------------------|--|-----------------------|
| Prueba             | MARCA      | # Cocimiento | Responsable | Granulometría (mL)                            | Extracto 1er mosto (°P) | Secuencia ingreso de TRUB a filtración | Extracto perdido (Kg) |
| 1                  | Producto 2 |              |             | 400   |                         | A                                      |                       |
| 2                  | Producto 2 |              |             | 400   |                         | A                                      |                       |
| 3                  | Producto 2 |              |             | 400   |                         | B                                      |                       |
| 4                  | Producto 2 |              |             | 400   |                         | B                                      |                       |
| 5                  | Producto 2 |              |             | 400   |                         | C                                      |                       |
| 6                  | Producto 2 |              |             | 400   |                         | C                                      |                       |
| 7                  | Producto 2 |              |             | 400   |                         | D                                      |                       |
| 8                  | Producto 2 |              |             | 400   |                         | D                                      |                       |

| Secuencia | Filtración del 1ER MOSTO | Filtración del 2DO MOSTO               |               |               |
|-----------|--------------------------|--|---------------|---------------|
|           | <u>1</u>                 | <u>2</u>                               | <u>3</u>      | <u>4</u>      |
| A         | NA                       | TRUB                                   | Últimas aguas | Agua de riego |
| B         | NA                       | TRUB + Últimas aguas (al mismo tiempo) |               | agua de riego |
| C         | NA                       | Últimas aguas                          | TRUB          | agua de riego |
| D         | NA                       | Últimas aguas                          |               | agua de riego |

Figura 17. Formato de recolección de datos para solución S1

### 2.6.2. S2: Estandarización de la Calidad de Molienda.

Con el fin de optimizar el proceso de filtración (lautering) y reducir el volumen de últimas aguas, recordando que a mayor volumen de estas aguas residuales mayor es la pérdida de kilogramos de extracto, se propone la puesta a punto (upholding) del molino. Este mantenimiento correctivo del molino busca mejorar y asegurar la integridad de la cáscara teniendo como resultado una mayor calidad de malta a utilizar en el molino y mejorando la filtración.

Para validar la necesidad de esta inversión, se utilizará las pruebas de calidad ya implementadas en el área de cocimiento, esta prueba se basa en cumplir el siguiente estándar:

- **Parámetro de referencia:** Una molienda de alta calidad establece que 100 g de cáscara deben ocupar un volumen mayor a 500 ml.
- **Metodología:** Mediante una regla de tres, se normaliza el peso de una muestra de cáscara de malta post molienda a 100 g para comparar su volumen equivalente contra el estándar de volumen mayor a 500 ml (**Figura 18**).



Figura 18. Prueba de Calidad para cáscara de malta post molienda

- **Registro:** Las pruebas de calidad para la cáscara de malta post molienda, se registran junto con las pruebas de granulometría dentro del archivo Granulometria.xlsx, como se muestra en la **Figura 19**.

|    | ELABORÓ                  |       |        | REVISÓ              |         |       | APROBÓ              |   |  |
|----|--------------------------|-------|--------|---------------------|---------|-------|---------------------|---|--|
|    | Supervisor Elaboración   |       |        | Gerente Elaboración |         |       | Gerente Elaboración |   |  |
| 6  |                          |       |        |                     |         |       |                     |   |  |
| 7  |                          |       |        |                     |         |       |                     |   |  |
| 8  |                          |       |        |                     |         |       |                     |   |  |
| 9  |                          |       |        |                     |         |       |                     |   |  |
| 10 | Fecha                    |       |        | Tipo de Malta       | Malta A |       | Peso Muestra        |   |  |
| 11 | Marca                    |       |        | Silo                | 5       |       | 509,2               |   |  |
| 12 |                          |       |        |                     |         |       |                     |   |  |
| 13 | Tamiz                    | 1     | 2      | 3                   | 4       | 5     | 6                   |   |  |
| 14 | Apertura                 | 1,25  | 1      | 0,5                 | 0,15    | 0,125 | llano               |   |  |
| 15 | Peso Tamiz               | 704,2 | 646,4  | 550,6               | 505,5   | 484,4 | 739,7               | Peso de la cáscara                                      |  |
| 16 | Peso Tamiz + Muestra     | 795,6 | 756,6  | 721,4               | 578,7   | 523,5 | 764,2               | Volumen de Cáscara                                      |  |
| 17 | Diferencia               | 91,4  | 110,2  | 170,8               | 73,2    | 39,1  | 24,5                | 410,284 >500 ml   |  |
| 18 | Resultado                | 10%   | 17%    | 31%                 | 13%     | 8%    | 3%                  | Nota: 100 gramos de cascavilla deben representar 500 ml |  |
| 19 | Parámetro                | >18%  | 8- 10% | 30- 35%             | 19- 23% | 5-9%  | 9-13%               |   |  |
| 20 | Apertura actual Rodillos | 1     |        | 0,55                |         | 0,4   |                     | 108   |  |
| 21 |                          |       |        |                     |         |       |                     |   |  |
| 22 |                          |       |        |                     |         |       |                     |   |  |
| 23 | Operador Responsable     |       |        |                     |         |       |                     |   |  |
| 24 |                          |       |        |                     |         |       |                     |   |  |

Figura 19. Registro prueba de granulometría y volumen de cáscara

### 2.6.3. S3: Diseño de experimento factorial

Siguiendo la metodología de la solución S1, se implementó un diseño de experimentos (DOE) factorial  $2^3$  (3 factores y 2 niveles por factor). El objetivo fue identificar los niveles óptimos para cada factor relacionado al volumen de agua en la etapa de filtración para minimizar el desperdicio. En este modelo, la variable de respuesta fueron los kilogramos de extracto perdidos, permitiendo determinar estadísticamente la combinación de factores que garantizó una menor pérdida. Los factores y niveles evaluados se detallaron en la **Tabla 4**.

Tabla 4. Factores y niveles por evaluar en solución S3

| <b>Factor</b>                              | <b>Tipo de variable</b> | <b>Nivel bajo (-)</b> | <b>Nivel alto (+)</b> |
|--|-------------------------|-----------------------|-----------------------|
| Flujo de filtración en olla Lauter (hl/hr) | Cuantitativa            | 200 hl/hr             | 300 hl/hr             |
| Volumen total de agua de riego (hl)        | Cuantitativa            | 260 hl                | 280 hl                |
| Volumen constante sobre afrecho            | Categorico              | Seco                  | Alto                  |

Debido a la planificación y disponibilidad de la planta, el experimento factorial de tres factores se realizó con un total 8 pruebas sin réplicas, permitiendo cubrir todas las combinaciones posibles de los niveles definidos.

Para asegurar la comparabilidad de los resultados y minimizar la variabilidad externa, se establecieron los mismos criterios de bloqueo empleados en el experimento S1, con la única variante de que, para estas pruebas, los datos obtenidos fueron parte de la producción del Producto 1. Los factores que se mantuvieron constantes durante las 8 corridas son:

- **Calidad de molienda:** Se garantizó que la integridad de la cáscara de malta post-molienda fuera idéntica en todas las muestras utilizadas para la filtración.
- **Estandarización de Producto:** Todas las pruebas se ejecutaron exclusivamente en la producción del Producto 1, por tener mayor disponibilidad de producción para realizar las pruebas.
- **Concentración del mosto:** Se mantuvo una concentración constante en el mosto que ingresa a filtración, con una tolerancia máxima de variación de  $\pm 1$  grado Plato ( $^{\circ}$ P) entre cada prueba para evitar sesgos en los resultados.

Para esta prueba también se creó un formato para asegurar la recolección de los datos y mantener las variables de bloque (**Figura 20**).

**Observación:**

- Granulometría debe ser la misma para cada prueba
- El extracto de 1er mosto debe ser el mismo para cada prueba (o conservar una variación de  $\pm 1$   $^{\circ}$ P)

| DATOS TRAZABILIDAD |            |       |             | VALORES A MANTENER CONSTANTES DURANTE PRUEBAS |                                    |                 | FACTORES POR CAMBIAR EN FILTRACIÓN |                     |                        | VALOR DE RESPUESTA    |
|--------------------|------------|-------|-------------|---|------------------------------------|-----------------|------------------------------------|---------------------|------------------------|-----------------------|
| Prueba             | MARCA      | Fecha | Responsable | Granulometría (mL)                            | Extracto 1er mosto ( $^{\circ}$ P) | Trub recuperado | Flujo (hL/hr)                      | Vol agua riego (hL) | Vol sobre afrecho (hL) | Extracto Perdido (Kg) |
| 1                  | Producto 1 |       |             |   |                                    | No              | 200                                | 280                 | Alto                   |                       |
| 2                  | Producto 1 |       |             |   |                                    | No              | 300                                | 260                 | Alto                   |                       |
| 3                  | Producto 1 |       |             |   |                                    | No              | 200                                | 260                 | Alto                   |                       |
| 4                  | Producto 1 |       |             |   |                                    | No              | 300                                | 260                 | Seco                   |                       |
| 5                  | Producto 1 |       |             |   |                                    | No              | 200                                | 260                 | Seco                   |                       |
| 6                  | Producto 1 |       |             |   |                                    | No              | 200                                | 280                 | Seco                   |                       |
| 7                  | Producto 1 |       |             |   |                                    | No              | 300                                | 280                 | Alto                   |                       |
| 8                  | Producto 1 |       |             |   |                                    | No              | 300                                | 280                 | Seco                   |                       |

Figura 20. Formato de recolección de datos para S3

## Capítulo 3

### 3. Resultados y análisis

#### 3.1. Resultados de la implementación de mejoras

##### 3.1.1. Resultados de la Solución S1: Optimización de la Secuencia de Filtración

La primera intervención abordó la ineficiencia hidráulica en el tanque de filtración. La hipótesis planteada fue que el orden en que se introducen los fluidos de recuperación (Trub y Últimas aguas de cocimientos previos) y el agua fresca afecta la dinámica de lavado de la cama de granos. Para probar esta hipótesis, se diseñó un Experimento Unifactorial con cuatro niveles (Secuencias A, B, C y D).

- Secuencia A: Trub, Últimas Aguas, Agua.
- Secuencia B (Actual): Mezcla simultánea.
- Secuencia C: Últimas Aguas ,Agua.
- Secuencia D: Sin Trub.

| Información del factor       |         | Medias                       |                |        |           |                  |
|------------------------------|---------|------------------------------|----------------|--------|-----------|------------------|
| Factor                       | Niveles | Valores                      |                |        |           |                  |
| Secuencia ingreso materiales | 4       | A; B; C; D                   |                |        |           |                  |
| Resumen del modelo           |         | Secuencia ingreso materiales | N              | Media  | Desv.Est. | IC de 95%        |
|                              | S       | R-cuad. (ajustado)           | R-cuad. (pred) |        |           |                  |
|                              | 13,9906 | 82,52%                       | 69,41%         | 30,08% |           |                  |
|                              |         | A                            | 2              | 82,81  | 5,69      | (55,34; 110,28)  |
|                              |         | B                            | 2              | 118,8  | 25,3      | (91,3; 146,2)    |
|                              |         | C                            | 2              | 139,07 | 8,14      | (111,61; 166,54) |
|                              |         | D                            | 2              | 96,25  | 6,49      | (68,78; 123,72)  |
|                              |         | Desv.Est. agrupada = 13,9906 |                |        |           |                  |

Figura 21. Análisis de varianza ANOVA para solución S1

Análisis de Varianza (ANOVA) del Experimento: El modelo estadístico arrojó un Coeficiente de Determinación ( $R^2$  del 82.52%) cuyos detalles se observan en la **Figura 21**. Este valor es sumamente alto para un proceso

industrial, indicando que el cambio de secuencia explica más del 80% de la variación observada en la pérdida de extracto.

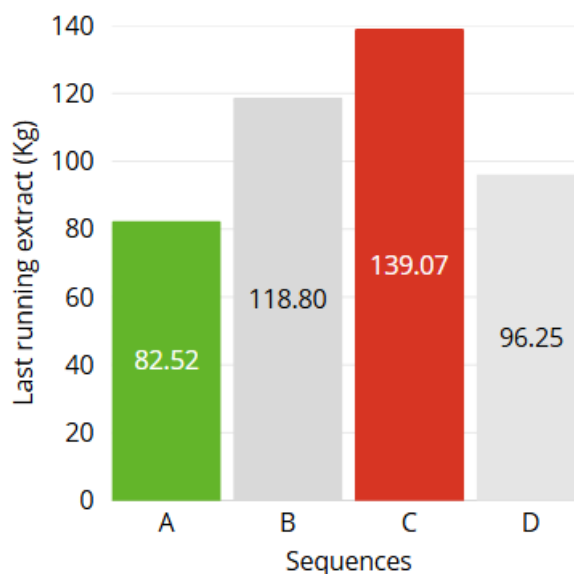


Figura 22. Resultados por nivel de implementación S1

La **Figura 22** ilustra la distribución de las pérdidas para cada secuencia. Se evidencia claramente que la **Secuencia A** presenta la media más baja (**82.81 Kg**) y una menor dispersión en comparación con la Secuencia B (media de 118.80 Kg) y la Secuencia C (media de 139.07 Kg).

Considerando cada secuencia implementada, la pérdida media se redujo de **101.28 Kg** a **82.52 Kg** por cocimiento, logrando una mejora del **18.26%**. de la prueba experimental realizada se concluye que la secuencia A favorece el flujo al ingresar primero el fluido más denso y cargado (Trub), seguido del intermedio (últimas aguas) y finalmente el agua limpia, se minimiza la mezcla turbulenta y se maximiza el arrastre de azúcares residuales.

Un beneficio adicional de determinar la secuencia A como la más óptima es que permite la recuperación del desecho de Trub con una media de **11**

**hL recuperado** por cocimiento, evitando su disposición como residuo industrial.

### ***3.1.2. Resultados de la Solución S2: Estandarización de la Calidad de Molienda.***

La segunda solución se centró en la física del medio filtrante. La permeabilidad de la cama de granos depende críticamente de la integridad de la cáscara de malta.

- **Validación de Hipótesis**

Se realizó una prueba de hipótesis comparando lotes con "Buena Molienda" (>500 ml) de volumen de cáscara en prueba de tamiz, versus "Mala Molienda" (<500 ml). El ANOVA resultante arrojó un valor p de 0.034, confirmando estadísticamente que la calidad de molienda impacta significativamente en el volumen de últimas aguas generado (ver **Figura 23** y **Figura 24**).

## 100% Malt Product Brews (Aug 02 – Oct 24) by Husk Quality

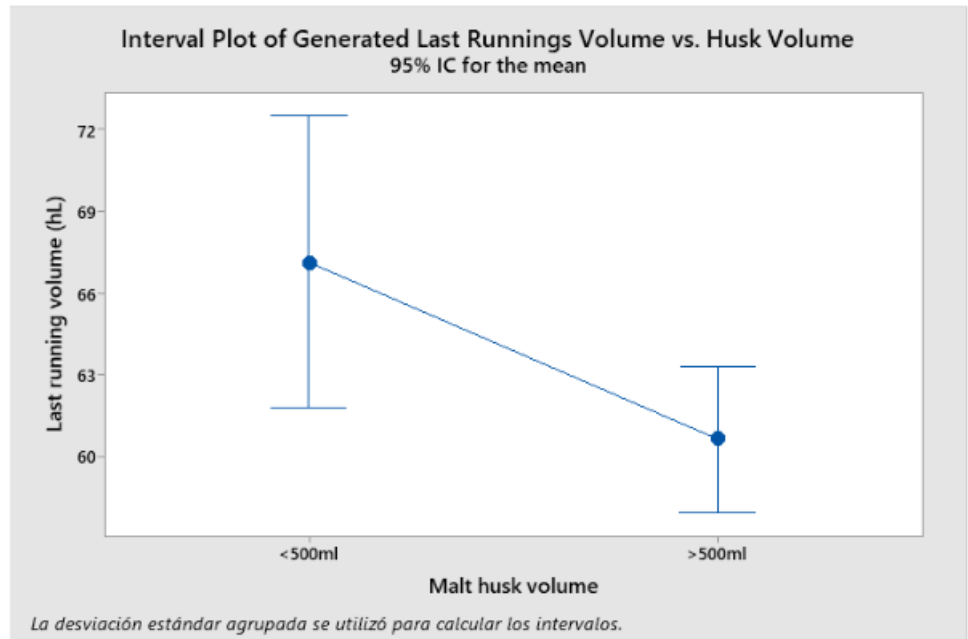


Figura 23. Gráfico de intervalos pruebas de calidad y volumen de últimas aguas

### Análisis de Varianza

| Fuente   | GL  | SC Ajust. | MC Ajust. | Valor F | Valor p |
|----------|-----|-----------|-----------|---------|---------|
| > 550 ml | 1   | 1113      | 1112,8    | 4,57    | 0,034   |
| Error    | 163 | 39726     | 243,7     |         |         |
| Total    | 164 | 40839     |           |         |         |

Figura 24. Análisis de varianza ANOVA pruebas de calidad para solución S2

- **Capacidad del proceso actual**

Para determinar si el proceso de molienda actual es capaz de garantizar la calidad de granos de malta, se realizó un análisis de capacidad al proceso de molienda recolectando 12 pruebas de calidad cada una proveniente de diferentes silos de malta (Figura 25).

| Date       | Silo | Malt | Sample weight (g) | Husk volume (ml) | Equivalent husk volume for 100 g (ml) | Husk quality reached (>500 ml) |
|------------|------|------|-------------------|------------------|---------------------------------------|--------------------------------|
| 27/8/2025  | 7    | C    | 550,2             | 500              | 520,83                                | Yes                            |
| 27/8/2025  | 7    | C    | 395,3             | 500              | 520,83                                | Yes                            |
| 22/9/2025  | 5    | A    | 465,8             | 320              | 563,38                                | Yes                            |
| 29/9/2025  | 12   | A    | 590,3             | 450              | 417,83                                | No                             |
| 6/10/2025  | 8    | C    | 393,3             | 300              | 561,80                                | Yes                            |
| 20/10/2025 | 4    | C    | 682,7             | 550              | 405,90                                | No                             |
| 28/10/2025 | 4    | C    | 755,6             | 450              | 395,08                                | No                             |
| 5/11/2025  | 5    | A    | 509,2             | 375              | 410,28                                | No                             |
| 11/11/2025 | 7    | C    | 420,5             | 375              | 437,57                                | No                             |
| 18/11/2025 | 7    | C    | 363,9             | 500              | 490,20                                | No                             |
| 25/11/2025 | 12   | C    | 434,4             | 350              | 458,72                                | No                             |
| 16/12/2025 | 8    | C    | 560,2             | 455              | 420,52                                | No                             |

Figura 25. Pruebas de calidad de etapa molienda (cáscaras de malta) realizadas

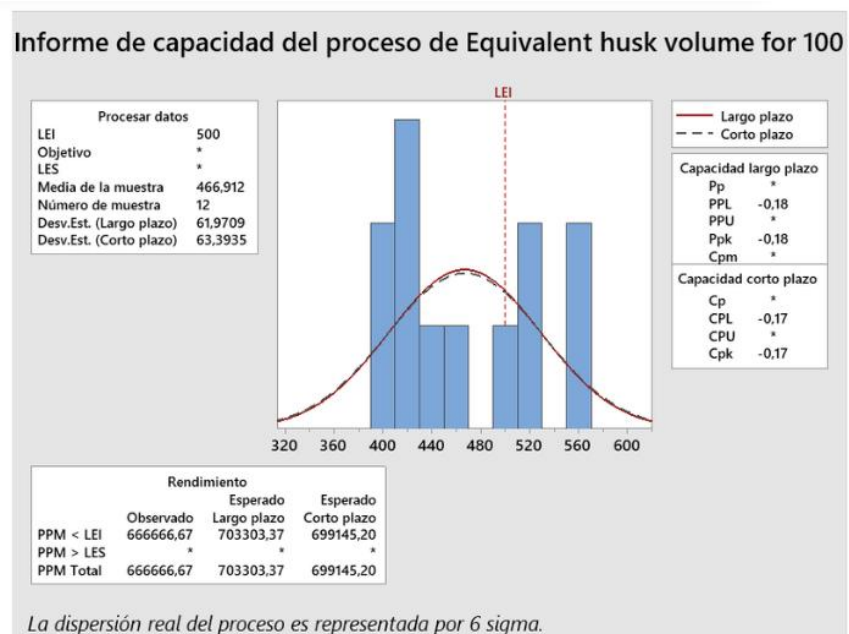


Figura 26. Análisis de capacidad en MINITAB para pruebas de calidad de etapa molienda

El análisis de capacidad (**Figura 26**) determinó que el proceso de molienda no es capaz actualmente de garantizar una cáscara de malta de calidad que cumpla con los estándares establecidos por la empresa.

- **Resultados de implementación de solución**

Como respuesta a los análisis previos, se ejecutó un plan de 'Mantenimiento y Estandarización del Molino' (*Upholding Mill Standards*), que incluyó limpieza profunda, cambio de rodamientos y ajuste de la brecha de los rodillos. Como resultado de esta intervención, la

**Figura 27** muestra el diagrama de cajas para los productos 1 y 2, los cuales pasaron a cumplir con los criterios de calidad, lo que a su vez disminuyó la pérdida de extracto. Finalmente, la proyección del extracto perdido esperado antes y después del mantenimiento se presenta en la **Figura 28**.

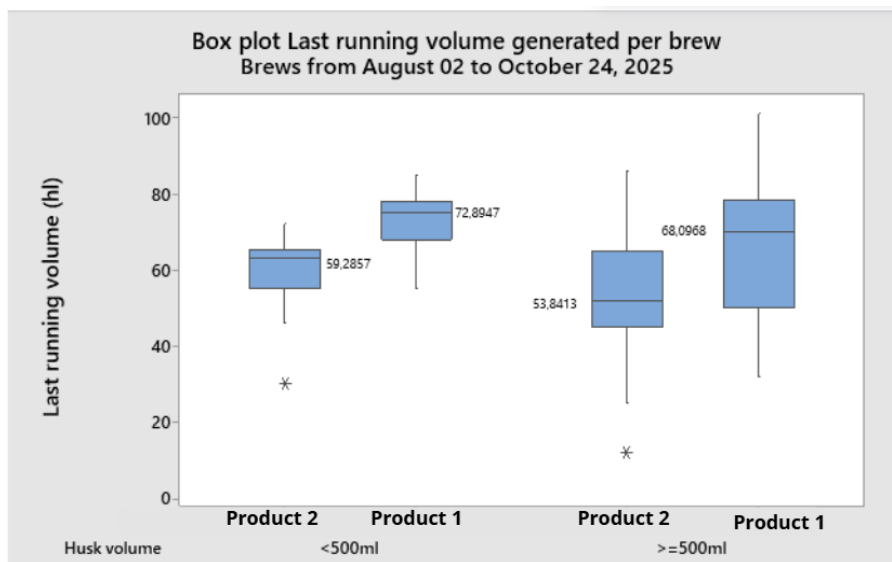


Figura 27. Diagrama de cajas para productos 1 y 2 que cumplen con criterios de calidad de molienda.

| Milling status  | Brand       | Last running (hl) |               |              | Extract lost (Kg) |
|-----------------|-------------|-------------------|---------------|--------------|-------------------|
|                 |             | Mean              | Max           | Min          | Mean              |
| Current         | Product 2   | 59,29             | 72,00         | 30,00        | 101,34            |
|                 | Product 1   | 72,89             | 85,00         | 55,00        | 124,58            |
|                 | <b>Both</b> | <b>66,09</b>      | <b>85,00</b>  | <b>30,00</b> | <b>112,92</b>     |
| After Upholding | Product 2   | 53,84             | 86,00         | 12,00        | 124,58            |
|                 | Product 1   | 68,10             | 101,00        | 32,00        | 116,39            |
|                 | <b>Both</b> | <b>60,97</b>      | <b>101,00</b> | <b>12,00</b> | <b>104,21</b>     |

Figura 28. Extracto perdido esperado antes y después de mantenimiento correctivo

Tras la intervención, se espera que el proceso de molienda garantice el cumplimiento del parámetro de calidad de cáscara de malta (>500 ml por muestra de calidad) establecida por la empresa en cada cocimiento. Por lo

que se proyectó una mejora en la reducción de volumen promedio de últimas aguas, lo que a su vez disminuyó la pérdida de extracto. Considerando la producción de ambos productos (Producto 1 y Producto 2) se proyectó el extracto perdido posterior a implementar el mantenimiento correctivo con la pérdida actual de extracto. Lo que resultó en una mejora, donde la pérdida de extracto bajó de una media de **112.92 Kg** a **104.21 Kg**, representando una mejora del **7.71%**.

### **3.1.3. Resultados de la Solución S3: Diseño Factorial de Parámetros**

La tercera solución buscó optimizar las variables de control del proceso mediante un **Diseño de Experimentos Factorial 2<sup>3</sup>**. Se evaluaron los factores:

- **A: Flujo de Filtración** (200 vs 300 hL/hr).
- **B: Volumen de Agua de Riego** (260 vs 280 hL).
- **C: Volumen sobre Afrecho** (Seco vs Alto).

El objetivo fue encontrar la combinación que minimizara la pérdida de extracto para la producción del Producto 1.

El análisis de las 8 corridas experimentales identificó la siguiente configuración óptima detallada en los resultados del diseño de experimentos en la **Figura 29** y los niveles óptimos de la **Figura 30**.

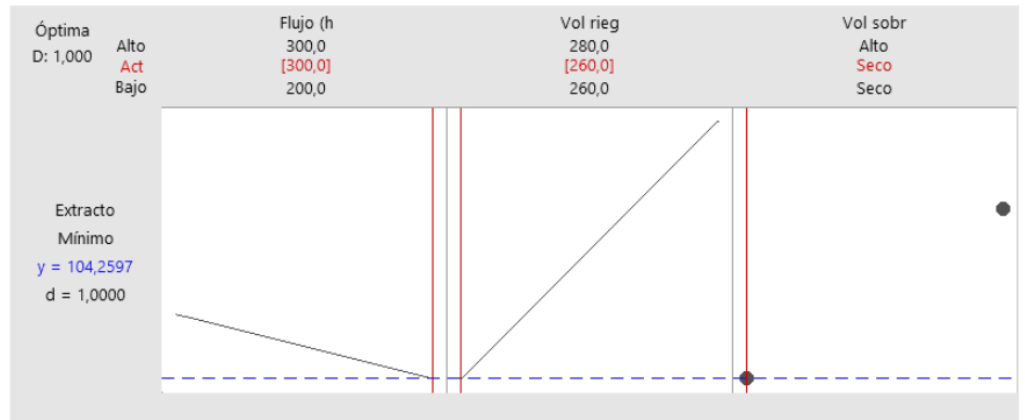


Figura 29. Resultados de análisis DOE en MINITAB para solución S3.

### Best combination

- In brewing for Product 1



| Factors                               | Best levels | Extract Loss (Kg) | Historical Extract Loss (Kg) |
|---------------------------------------|-------------|-------------------|------------------------------|
| Lauter Tun filtration flow (hl/hr)    | 300 (High)  | 104,25 Kg         | 114,95                       |
| Total sparge water volume (hl)        | 260 (Low)   |                   |                              |
| Constant volume over spent grain (hl) | Seco (Low)  |                   |                              |

Figura 30. Niveles óptimos para parámetros de filtración de segundo mosto

- **Flujo Alto (300 hL/hr):** Contrario a la intuición de que "filtrar lento es mejor", un flujo mayor favoreció la eficiencia en este sistema, posiblemente por reducir tiempos de residencia ineficientes.
- **Agua de Riego Baja (260 hL):** Se demostró que se podía reducir el consumo de agua en 20 hL sin sacrificar la extracción de azúcar. El exceso de agua (280 hL) solo diluía el efluente final.
- **Cama Seca:** Mantener un nivel mínimo de líquido sobre el grano mejoró el lavado.

**Impacto:**

Al estandarizar estos parámetros, la pérdida de extracto para *Heineken* se redujo de **114.95 Kg** a **104.25 Kg (9.31% de mejora)**. Además, un hallazgo adicional fue la posibilidad de reducir el consumo de agua fresca en **20 hL por cocimiento** sin afectar la calidad, lo cual constituye un ahorro directo de recursos naturales.

**3.2. Resultados de implementación**

La implementación de las tres soluciones (S1 + S2 + S3) revelaron los siguientes resultados:

**3.2.1. Validación Estadística de la Mejora Global**

A continuación, se detalla los resultados obtenidos por cada solución implementada, junto con la mejora que estos representaron al proceso, tanto individualmente como en conjunto graficados en la **Figura 31** y resumidos en la Figura 32.

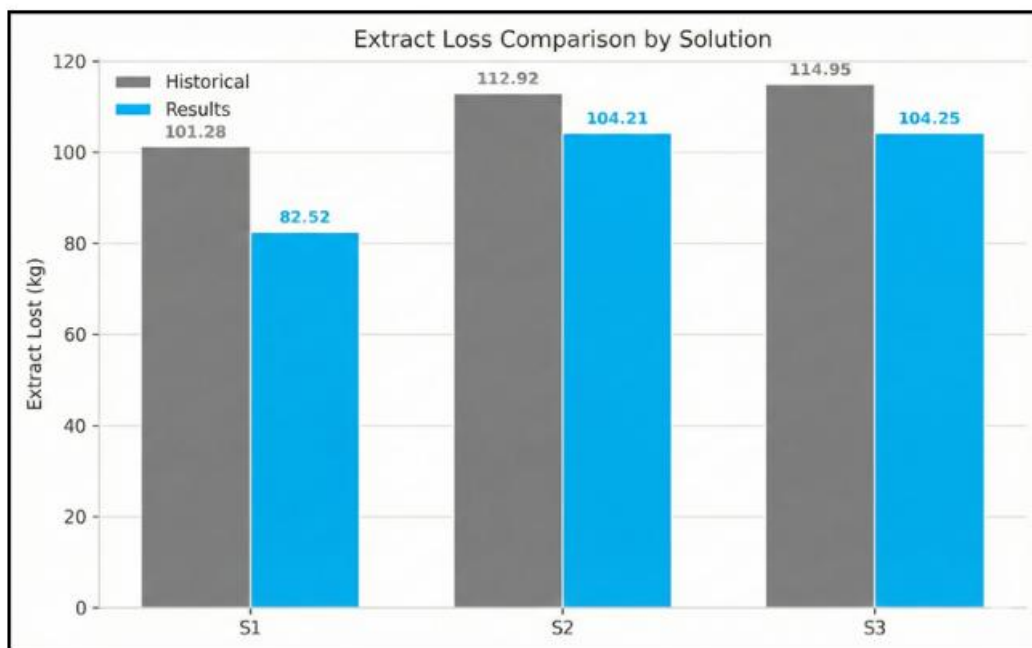


Figura 31. Gráfica de barras para resultados individuales por soluciones implementadas

| Implemented Solution | Products        | Extract loss (Kg) |         | Reduction |               |
|----------------------|-----------------|-------------------|---------|-----------|---------------|
|                      |                 | Historical        | Results |           |               |
| S3                   | Product 1       | 114,95            | 104,25  | 9,31%     | <b>11,76%</b> |
| S1                   | Product 2       | 101,28            | 82,52   | 18,26%    |               |
| S2                   | Product 1 and 2 | 112,92            | 104,21  | 7,71%     |               |

Figura 32. Resumen de resultados individuales por soluciones implementadas

Se concluye que las implementaciones realizadas lograron una mejora global del 11,78% para la producción de productos 1 y 2.

Para determinar el impacto las soluciones tendrán en toda la producción de productos 100% malta, el cual es el objetivo del proyecto, se utilizó el gap global (11,78%) en los datos históricos de cocimientos de estos productos, obteniendo una reducción de 101,30 Kg de extracto perdido a 89,38 Kg como se puede apreciar en la **Figura 33**.

| Implemented Solution | Products        | Historical extract loss (Kg) | Reduction | Expected extract loss (Kg) |
|----------------------|-----------------|------------------------------|-----------|----------------------------|
| S1+S2+S3             | 100% Malt beers | 101,30                       | 11,76%    | <b>89,38</b>               |

Figura 33. Reducción de extracto perdido en últimas aguas para productos 100% malta

Para confirmar que las acciones implementadas a lo largo del proyecto reflejan una mejora del proceso de Lautering, se compararon las distribuciones de pérdida de extracto "Antes" y "Después" de la implementación integral de las soluciones.

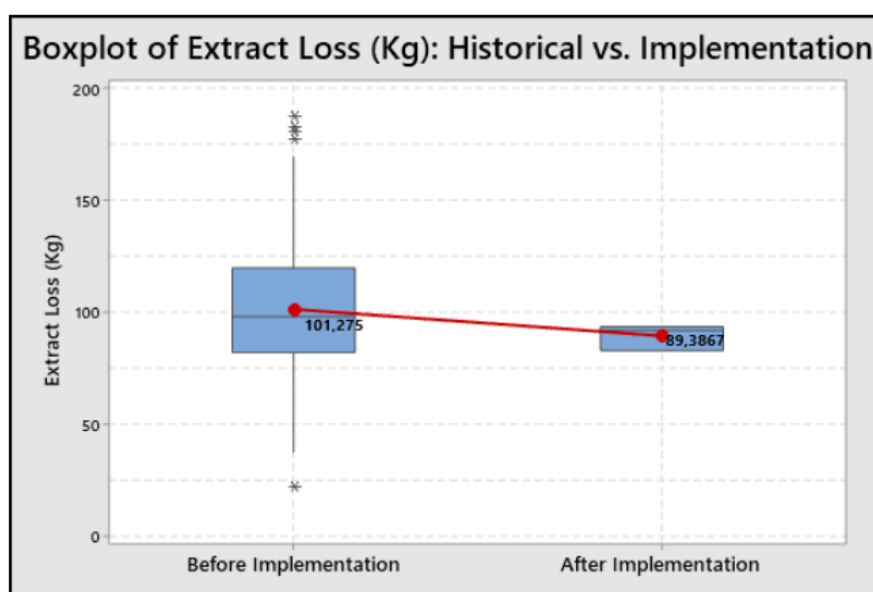


Figura 34. Gráfica de cajas de extracto perdido antes y después de implementación de soluciones

La **Figura 34** muestra una reducción contundente tanto en la tendencia central como en la dispersión de los datos. Logrando disminuir la media inicial de 101.30 kg a una media final de 89.38 kg, lo que representa un ahorro directo de 11.92 kg por cada cocimiento con una mejora porcentual del 11.76%.

### 3.3. Costos de implementación

#### 3.3.1. Costo implementación de Solución S1: Optimización de la Secuencia de Filtración

Debido a que la prueba experimental se realizó durante la producción diaria, solo se cuantificó las implicaciones adicionales que se tuvieron que realizar en la producción; al solo cambiar la secuencia de orden de ingreso, el único cambio en la producción para producto 2 fue el desperdicio de Trub.

El total de trub desperdiciado fue de un total de 22 hl durante la prueba experimental. Considerando que 11 hl de trub al desperdiciado equivalen a \$82.80.

El costo total de la implementación es de un total de \$165,60 como se puede apreciar en la **Tabla 5**.

Tabla 5. Costo de implementación de solución S1

| <b>Parámetro</b>    | <b>Producción regular</b> | <b>Prueba experimental</b> | <b>Diferencia</b> | <b>Costo</b>      | <b>Costo total</b> |
|---------------------|---------------------------|----------------------------|-------------------|-------------------|--------------------|
| Trub desechado (hl) | 0 hl                      | 22 hl                      | 22 hl             | \$82.80/<br>11 hl | \$165.60           |

#### 3.3.2. Costo implementación de Solución S2: Estandarización de la Calidad de Molienda.

En base a los requerimientos del molino y los protocolos de mantenimiento por parte de la empresa, se estimó el siguiente valor tanto (**Tabla 6**) para el mantenimiento correctivo como para las pruebas de calidad, a excepción que este último no tuvo impacto económico ya que es un procedimiento que se realiza de forma estándar y ya está contemplado en los costos la producción diaria.

Tabla 6. Costo de implementación de solución S2

| <b>Parámetro</b> | <b>Costo de mantenimiento correctivo</b> | <b>Costo de pruebas de calidad a molienda</b> | <b>Costo total</b> |
|------------------|--|---|--------------------|
| Costo (\$)       | \$30,000.00                              | \$0.00  | \$30,000.00        |

### **3.3.3. Costo implementación de Solución S3: Estandarización de la Calidad de Molienda.**

De manera similar a la solución S1, la implementación de la solución S3 se realizó durante la producción diaria. Donde el único impacto a que ocasionó dicha solución a la producción fue el volumen de agua total a utilizar. Para un ciclo de 8 cocimientos regulares del producto 1, las pruebas experimentales requirieron un volumen adicional de 80 hl de agua en comparación con el estándar de producción. El detalle del costo de implementación se encuentra a continuación en la **Tabla 7**.

Tabla 7. Costo de Implementación de solución S3

| <b>Parámetro</b>          | <b>Producción regular</b> | <b>Prueba experimental</b> | <b>Diferencia</b> | <b>Costo</b>     | <b>Costo total</b> |
|---------------------------|---------------------------|----------------------------|-------------------|------------------|--------------------|
| Agua total utilizada (hl) | 2080 hl                   | 2160 hl                    | 80 hl             | \$2.07/<br>10 hl | \$16.56            |

### **3.3.4. Resumen costos de implementación**

A continuación, se muestra la tabla con los costos de implementación por solución propuesta en la **Tabla 8**.

Tabla 8. Resumen costo de implementación de soluciones

| <b>Solución implementada</b> |  | <b>Costo</b> |
|------------------------------|--|--------------|
| S1                           | Optimización de la Secuencia de Filtración   | \$165.60     |
| S2                           | Estandarización de la Calidad de Molienda.   | \$30,000.00  |
| S3                           | : Estandarización de la Calidad de Molienda. | \$16.56      |
| Total                        |  | \$30,182.00  |

### 3.4. Resultados alineados al Triple Bottom Line

El éxito de un proyecto de ingeniería moderna no se mide solo en kilogramos o eficiencias técnicas, sino en su impacto integral en la sostenibilidad del negocio. A continuación, se desglosa el impacto en las tres dimensiones del *Triple Bottom Line*:

**3.4.1. Dimensión Económica (Profit):** El beneficio financiero directo proviene de la recuperación de extracto (materia prima que antes se desperdiciaba). Considerando un costo de extracto base, la recuperación de 11.92 Kg representa un ahorro de **\$17.58 USD por cocimiento**. Si bien el ahorro unitario puede parecer moderado, al proyectarse al volumen anual de producción (con múltiples cocimientos diarios), el monto asciende a cifras significativas que impactan el estado de resultados (*P&L*). El análisis costo-beneficio revela:

- **Costo de Implementación:** Aproximadamente \$30,182 USD, mayoritariamente asociados al mantenimiento correctivo del molino (S2), el cual era un gasto necesario diferido.

- **Retorno:** El ahorro recurrente en materiales (malta) y la reducción de costos de tratamiento de aguas residuales aseguran un retorno de inversión (ROI) atractivo en el corto plazo.

#### **3.4.2. Dimensión Ambiental (Planet)**

Este proyecto se alinea fuertemente con los objetivos de desarrollo sostenible (ODS) relacionados con el agua y la producción responsable.

- La optimización de parámetros (S3) redujo el consumo de agua fresca en **20 hL** por cocimiento.
- La mejora en molienda (S2) redujo la generación de aguas residuales en **5.12 hL**.
- La nueva secuencia de ingreso para recuperación de extracto (S1) permite reincorporar **11 hL de Trub** al proceso, evitando que este sea desperdiciado.

En total se ahorra 36.12 hL de líquidos por cocimiento al implementar las soluciones propuestas. Disminuyendo el consumo de agua y aportando a la sostenibilidad ambiental.

#### **3.4.3. Dimensión Social (People)**

Al inicio del proyecto, se identificó que solo el 25% del personal (1 operador) tenía conocimiento sobre la mejora continua y metodología DMAIC. Al implementar soluciones, en especial las soluciones S1 y S3 enfocadas en el diseño de experimentos, se capacitó al personal perteneciente al área de cocimiento como parte de la implementación de dichas soluciones, para garantizar la correcta recolección y garantizar la confiabilidad de los datos. Como resultado, el indicador de competencia técnica aumentó al **75% (3 operadores capacitados)**. Esto no solo garantiza que las mejoras se mantengan en el tiempo, sino que empodera al

personal operativo, otorgándoles herramientas de análisis y control que enriquecen su perfil profesional y fomentan una cultura de calidad en la planta.

## Capítulo 4

### 4.1 Conclusiones y recomendaciones

#### 4.1.1 Conclusiones

Tras la implementación de las soluciones propuestas (S1, S2 y S3) se observó una reducción global del 11,76% en la pérdida de kilogramos de extracto en últimas aguas, lo que conlleva a las siguientes conclusiones:

- Se cumplió con el objetivo general del proyecto, el cual consistió en reducir la pérdida de extracto en últimas aguas, estableciendo un mínimo de mejora del 11,15%, el cual fue sobrepasado alcanzando un nivel de mejora del 11,76%.
- Se concluyó que, para optimizar la recuperación de extracto proveniente de residuos previos (últimas aguas y trub) en la filtración del segundo mosto, es fundamental que el Trub se introduzca lo más pronto posible en el ciclo de filtración. Esto se debe a que el trub presenta la mayor concentración de extracto residual y, por tanto, demanda un tiempo de lavado y contacto más prolongado para ser extraído eficientemente.
- Se verificó que, para asegurar una filtración funcional, se requiere una molienda óptima capaz de preservar la integridad de la cáscara sin resquebrajarla ni partirla excesivamente. Es indispensable asegurar la calidad de la cáscara de malta en la etapa de molienda, ya que dicha cáscara actúa como el medio filtrante natural necesario para asentar el lecho y permitir una separación eficiente del extracto de mosto.

Se determinó, mediante el análisis de parámetros de filtración y volumen de agua, que un mayor volumen de agua no garantiza necesariamente una mejor recuperación de extracto. Los resultados del Diseño de Experimentos (DOE) revelaron que es

posible reducir el consumo de agua de lavado siempre que se asegure un flujo elevado y constante durante toda la etapa de filtración.

#### ***4.1.2 Recomendaciones***

- En primer lugar, se recomienda validar que la información registrada en los datos históricos por la compañía sea precisa. Dado que durante el estudio se detectó un mal funcionamiento en el lector del silo de malta, es indispensable asegurar la fiabilidad de las mediciones futuras o, en su defecto, ajustar el análisis considerando el margen de variación identificado en las lecturas del sistema.
- Previo a realizar pruebas experimentales, se recomienda validar que el plan experimental sea compatible con la producción diaria, para poder alinear el número de cocimientos requeridos con la capacidad operativa mínima.
- En caso de realizar otros experimentos, se recomienda coordinar con el personal técnico para garantizar que los factores y niveles evaluados no alteren la receta original ni impacten negativamente la calidad de producción, asegurando que el producto final cumpla con los parámetros de salida de la empresa.
- Se recomienda verificar si el proceso es capaz de aislar y mantener constantes los factores de bloqueo propuestos durante las pruebas experimentales, garantizando así la integridad estadística del experimento sin comprometer la continuidad del proceso.
- Al proponer una solución que requiera de una gran inversión, se recomienda realizar pruebas estadísticas de calidad al proceso que se propone mejorar, como lo son el análisis de capacidad o gráficas de control, con el fin de justificar dicha inversión y poder comparar los beneficios a largo plazo.

## Referencias

- [1] Alston Brewing. (2024). 7BBL 10BBL 15BBL Brewhouse with direct fire heating. <https://www.alstonbrewing.com/7bbl-10bbl-15bbl-brewhouse-with-direct-fire-heating-product/>
- [2] Canalupe. (2024). Filtración y lavado de bagazo. Wiki Canalupe. <https://canalupe.com/wiki/filtracion-y-lavado-de-bagazo/>
- [3] Goldammer, T. (2022). The Brewer's Handbook: A Complete Guide to Brewing Beer (3.<sup>a</sup> ed.). Apex Publishers.
- [4] Gómez, A., & Smith, J. (2021). Análisis térmico y enzimático en la maceración industrial. *Journal of Brewing Science*, 45(2), 112-125.
- [5] Minitab, LLC. (2024). Minitab Statistical Software (Versión 21) [Software de computación]. <https://www.minitab.com>
- [6] Montgomery, D. C. (2020). *Design and Analysis of Experiments* (10.<sup>a</sup> ed.). Wiley.
- [7] Pande, P. S., Neuman, R. P., & Cavanagh, R. R. (2000). *The Six Sigma Way: How GE, Motorola, and Other Top Companies are Honing Their Performance*. McGraw-Hill.
- [8] Pérez, L., Rodríguez, M., & García, O. (2023). Optimización de la molienda y su impacto en la porosidad del lecho filtrante. *Brewing & Beverage Technologies*, 12(1), 45-58.
- [9] Socconini, L. (2021). *Lean Six Sigma: Sistema de mejora continua de la calidad y la productividad*. Editorial MGE.

## ANEXOS

### Diagrama SIPOC del proceso de cocimiento

| SUPPLIERS                      | INPUT   | PROCESS      | OUTPUT   | CLIENT                       |
|--------------------------------|---|--------------|--|------------------------------|
| Malt supplier<br>Rice supplier | <b>Main input</b><br>• Malt<br>• Rice   | 1. Milling   | <b>Main output</b><br>• Malt extract<br>• Rice extract<br>• Bran               | Brewhouse area               |
| Public water<br>Brewhouse area | <b>Main input</b><br>• Malt extract<br>• Rice extract<br>• Brand<br>• Water<br><b>Supplements</b><br>• Chemical suplement | 2. Mashing   | <b>Main output</b><br>• Wort<br>• Bran<br>• Water                              | Brewhouse area               |
| Public water<br>Brewhouse area | <b>Main input</b><br>• Wort<br>• Bran<br>• Water<br><b>Supplements</b><br>• Chemical suplement                            | 3. Lautering | <b>Main output</b><br>• Sweet wort<br><b>Waste</b><br>• Last running<br>• Bran | Brewhouse area<br>Waste area |
| Hob supplier<br>Brewhouse area | <b>Main input</b><br>• Sweet wort<br>• Hob<br><b>Supplements</b><br>• Chemical suplement                                  | 4. Boiling   | <b>Main output</b><br>• Boiled wort  | Brewhouse area               |
| Brewhouse area                 | <b>Main input</b><br>• Boiled wort<br><b>Supplements</b><br>• Nutrients   | 5. Whirlpool | <b>Main output</b><br>• Boiled wort<br><b>Waste</b><br>• Trub                  | Brewhouse area<br>Waste area |
| Brewhouse area                 | <b>Main input</b><br>• Boiled wort  | 6. Cooling   | <b>Main output</b><br>• Cool wort  | Brewing cellars area         |

Figura 35. Diagrama SIPOC proceso cocimiento

### Diagrama de afinidad para determinar necesidades del cliente

## Affinity diagram

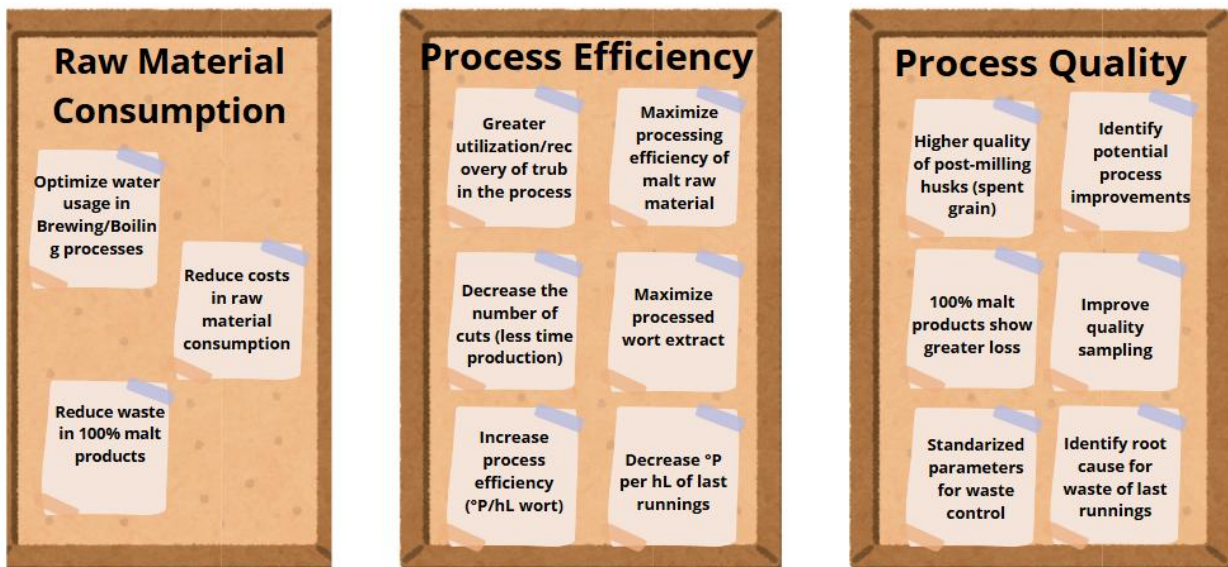


Figura 36. Diagrama de afinidad

## Diagrama de árbol Critical to Quality (CTQ)

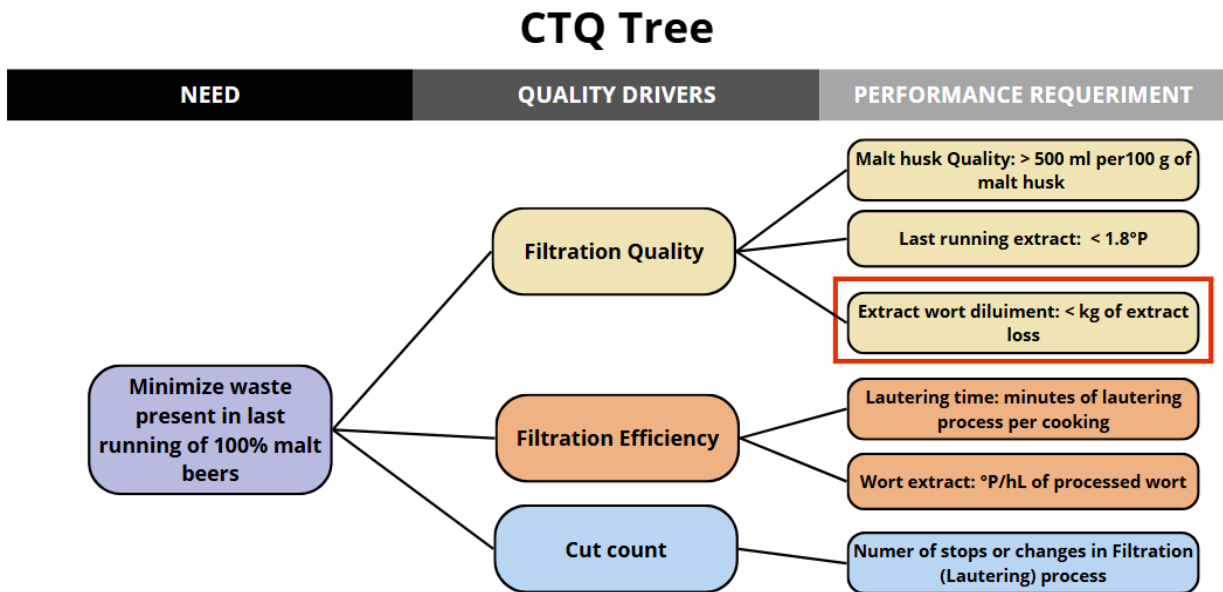


Figura 37. Diagrama de árbol CTQ

## Diagrama ISHIKAWA para lluvia de ideas de causas

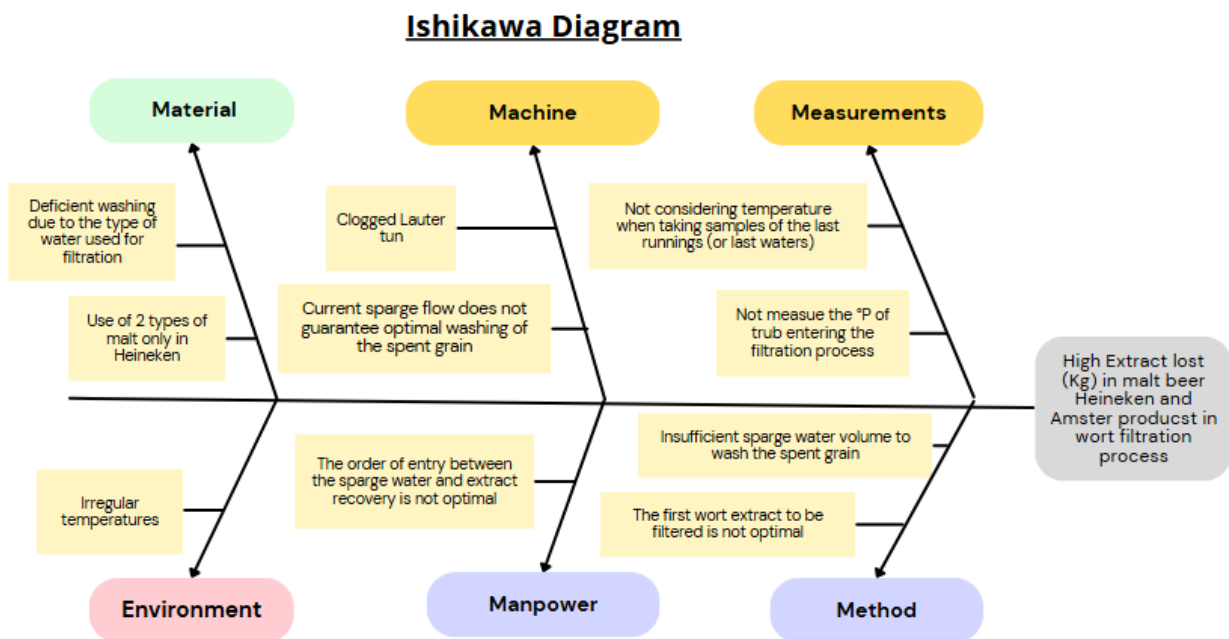


Figura 38. Diagrama ISHIKAWA

## Diagrama de Pareto para causas potenciales

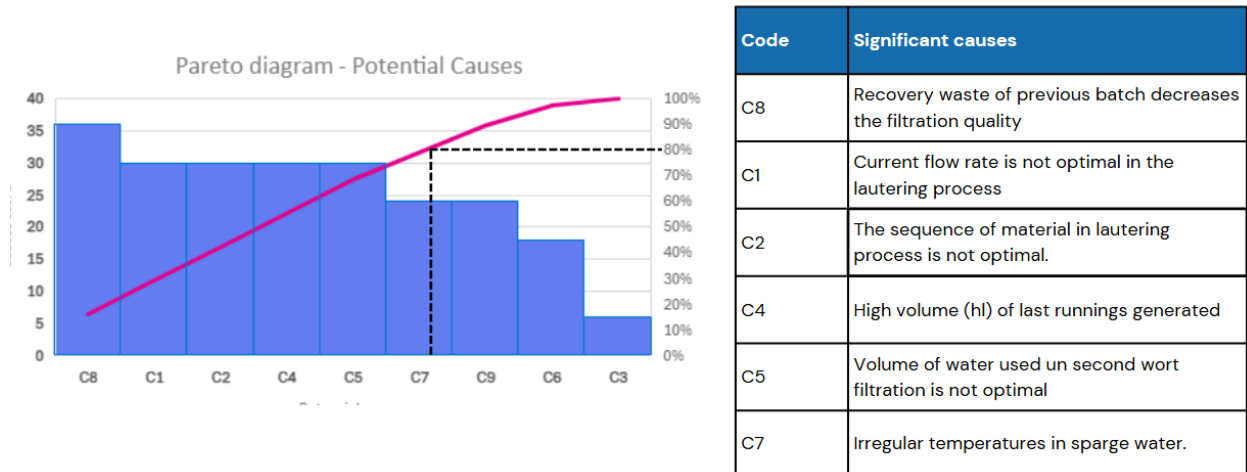


Figura 39. Pareto causas potenciales

## Matriz impacto-esfuerzo para causas

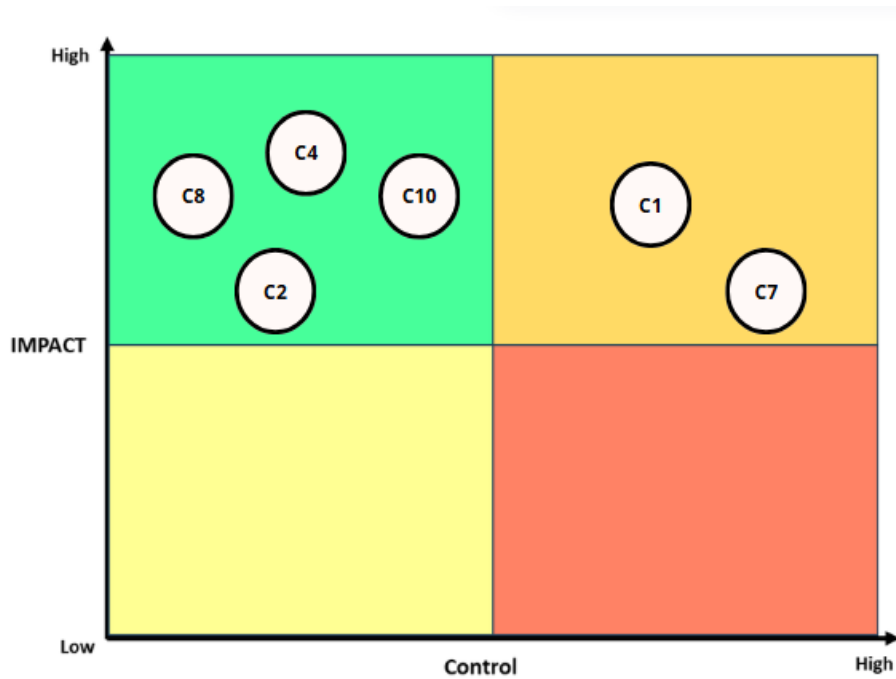


Figura 40. Matriz Impacto control soluciones potenciales

## Herramienta 5 Porque para causa raíz

| Code            | C2   | C4   | C5   | C8   |
|-----------------|--|--|--|--|
| Potential cause | The sequence of material in lautering process is not optimal.          | High volume (hL) of last runnings generated                  | Volume of water used in second wort filtration is not optimal  | Recovery waste of previous batch decreases the filtration quality  |
| Why?            | Because there is no established standard in this phase of the process. | Inconsistent malt milling quality.                           | There is no study to identify the optimal parameters related to water consumption in lautering and Extract lost (Kg) | During the first brew only (startup), sparge water is used exclusively for the second wort filtration    |
| Why?            | The optimal sequence of raw material input had not been analyzed.      | The mill does not guarantee consistent granulometry quality. |  | Next batches add recovery waste (last runnings and trub from previous batches).in second wort filtration |
| Why?            |  |  |  | It is believed that recovering these waste products improves filtration efficiency                       |

Figura 41. Causas raíz Herramienta 5 Porque

## Recoleccion de datos para solución S1

| # | C1     | C2-T  | C3         | C4-T        | C7                 | C9                      | C13-T                        | C14                        | C15              | C16                     |
|---|--------|-------|------------|-------------|--------------------|-------------------------|------------------------------|----------------------------|------------------|-------------------------|
|   | Prueba | MARCA | Cocimiento | Responsable | Granulometría (mL) | Extracto ter mosto (*P) | Secuencia ingreso materiales | Volumen ultimas aguas (hl) | *P Ultimas aguas | Extracto ult aguas (Kg) |
| 1 | 1      |       | 24         | Alberto     | 400                | 22,3                    | A                            | 49                         | 1,60             | 78,79                   |
| 2 | 2      |       | 31         | Alberto     | 400                | 20,4                    | A                            | 54                         | 1,60             | 86,83                   |
| 3 | 3      |       | 23         | Alberto     | 400                | 20,2                    | B                            | 59                         | 1,70             | 100,84                  |
| 4 | 4      |       | 32         | Ivan        | 400                | 20,5                    | B                            | 85                         | 1,60             | 136,68                  |
| 5 | 5      |       | 26         | Ivan        | 400                | 20,6                    | C                            | 80                         | 1,80             | 144,83                  |
| 6 | 6      |       | 33         | Luis        | 400                | 20,1                    | C                            | 78                         | 1,70             | 133,32                  |
| 7 | 7      |       | 28         | Luis        | 400                | 20,4                    | D                            | 57                         | 1,60             | 91,66                   |
| 8 | 8      |       | 23         | Xavier      | 400                | 20,2                    | D                            | 59                         | 1,50             | 100,84                  |

Figura 42. Datos recopilados en MINITAB para Solución S1

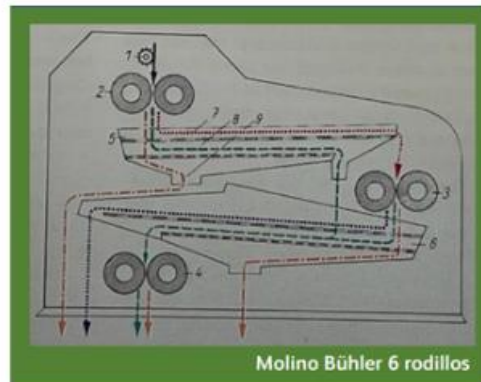
## Proceso de Molienda



Figura 43. Proceso de Molienda

## Especificaciones de molino actual

| Mill details    |  |
|-----------------|--|
| Mill Type:      | 6-Roller Mill (Multi-stage crushing)                         |
| Gap Adjustment: | Specialized manual gap adjustment                            |
| Sampling Ports: | Integrated sampling ports for easy sample collection.        |
| Capacity:       | Designed for 2-hour milling cycles for 2500 - 8500 g of malt |



- (1) Distributor
- (2) Preliminary roller pair
- (3) Husk roller pair
- (4) Roller pair
- (5) Upper vibrating screen unit
- (6) Lower vibrating screen unit

Figura 44. Especificaciones del molino actual

## Tabla de objetivos de mantenimiento para solución S2: Estandarización de la Calidad de Molienda.

| Maintenance requeriments    | Status | Maintenance Results |
|-----------------------------|--------|---------------------|
| consistent grinding quality | No     | Yes                 |
| Deep cleaning components    | No     | Yes                 |
| Electric motor substitution | No     | Yes                 |
| Roller gap adjustment       | No     | Yes                 |
| Grinding capacity settings  | Yes    | Yes                 |
| Uniform feed rate           | Yes    | Yes                 |

Figura 45. Objetivos de mantenimiento correctivo a molino