

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ

Colegio de Ciencias e Ingenierías

**Propuesta para disminuir la merma de producto en el proceso
de pasteurización de cerveza, aplicando la metodología de
diseño de experimentos**

**Sistematización de experiencias prácticas de investigación y/o
Intervención**

Juan Benigno Malo Valdivieso

Ingeniería Industrial

**Trabajo de titulación presentado como requisito
para la obtención del título de
Ingeniero Industrial**

Quito, 20 de diciembre de 2017

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ
COLEGIO DE CIENCIAS E INGENIERÍAS

HOJA DE CALIFICACIÓN
DE TRABAJO DE TITULACIÓN

Propuesta para disminuir la merma de producto en el proceso de pasteurización
de cerveza, aplicando la metodología de diseño de experimentos

Juan Benigno Malo Valdivieso

Calificación:

Nombre del profesor, Título académico

María Gabriela García Rodríguez,
Dr. Sc.

Firma del profesor

Quito, 20 de diciembre de 2017

Derechos de Autor

Por medio del presente documento certifico que he leído todas las Políticas y Manuales de la Universidad San Francisco de Quito USFQ, incluyendo la Política de Propiedad Intelectual USFQ, y estoy de acuerdo con su contenido, por lo que los derechos de propiedad intelectual del presente trabajo quedan sujetos a lo dispuesto en esas Políticas.

Asimismo, autorizo a la USFQ para que realice la digitalización y publicación de este trabajo en el repositorio virtual, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Firma del estudiante:

Nombres y apellidos:

Juan Benigno Malo Valdivieso

Código:

00107846

Cédula de Identidad:

1715954648

Lugar y fecha:

Quito, 20 de diciembre de 2017

RESUMEN

El objetivo de este estudio fue reducir el porcentaje de merma de producto no conforme, en el proceso de pasteurización de cerveza, tras presentar pérdidas considerables tanto de botellas rotas como destapadas. Para esto se utilizó la metodología de diseño de experimentos planteada por Douglas C. Montgomery. Se realizó un diseño central compuesto en donde se evaluó, utilizando la metodología de superficies de respuesta (RSM), el efecto en las variables de porcentaje de merma de producto, costo de producción e inactivación microbiana. Se empleó una función de deseabilidad para determinar los niveles óptimos de los factores, dando como resultado lo siguiente: ingresar las jabs al tanque de pasteurización a una temperatura de 59°C, para después alcanzar una temperatura de inactivación de 62°C, manteniendo ésta durante 9 minutos. Posteriormente se evaluó la configuración ideal, llegando a tener una desviación máxima de 9.2% con respecto a los datos predichos. El resultado de aplicar esta combinación exitosa significó para la empresa una reducción de 4.35% sobre su configuración predecesora, permitiéndole llegar a tener una reducción económica anual de hasta cuatro dígitos.

Palabras clave: Diseño central compuesto, Metodología de Superficies de Respuesta, Pasteurización de cerveza.

ABSTRACT

The objective of this study was to reduce the percentage of non-conforming product in the beer pasteurization process after presenting considerable losses of both, broken and uncovered bottles. For this, the experimental design methodology proposed by Douglas C. Montgomery was used. A central composite design (CCD) was carried out using the response surface methodology (RSM) to determine the effect on the variables: percentage of non-conforming product, cost of production and microbial inactivation. A desirability function was used to determine the optimum level of the factors resulting in the following combination: entering the crates into the pasteurization tank at a temperature of 59°C to then reach an inactivation temperature of 62°C, maintaining it for 9 minutes. Subsequently, the ideal configuration was evaluated, reaching a maximum deviation of 9.2% in contrast to the predicted data. The result of applying this successful combination meant the company a reduction of 4.35% over its predecessor configuration allowing it to have an annual economic saving of up to four digits.

Key words: Central composite design, Response Surface Methodology, Beer pasteurization.

TABLA DE CONTENIDO

1. Introducción.....	7
2. Métodos y materiales	11
2.1. Reconocimiento y medición del problema.....	11
2.2. Diseño experimental.....	13
2.3. Selección de los factores de estudio	14
2.4. Variables de respuestas	15
2.5. Elección del diseño experimental	17
2.6. Función de Deseabilidad	18
2.7. Procedimiento para la toma de datos.....	19
3. Resultados y discusión	19
3.1. Cumplimiento de supuestos	19
3.2. Porcentaje de merma por corrida.....	21
3.3. Costo de realizar la corrida	22
3.4. Tasa de inactivación de microorganismos.....	22
3.5. Función de deseabilidad	23
3.6. Aplicación de solución óptima en el proceso	25
4. Conclusiones y recomendaciones	26
5. Referencias bibliográficas.....	28
Anexo A: Orden de corridas del experimento y combinaciones de factores.....	32
Anexo B: Superficies de respuesta y gráficas de contorno de las variables estudiadas.....	33

1. Introducción

1.1. Historia de la cerveza

Cerveza es un nombre genérico para bebidas hechas por fermentación de extractos de cereales, particularmente de cebada u otro material almidonado ([Hankin, 1988](#)). La elaboración de cerveza data de alrededor de 6000 años atrás en la región sureste de Mesopotamia ([Goldhammer, 2008](#)). En la actualidad la producción industrial de cerveza termina con un proceso térmico, cuyo objetivo es aumentar la vida útil y estabilización de la cerveza ([Alami, Alkhafaji & Silva, 2014](#)).

1.2. Historia de la pasteurización

El proceso de pasteurización fue inventado por el científico francés Louis Pasteur a mediados del siglo XIX. En sus investigaciones sobre la fermentación de vino y cerveza en las décadas de 1860 y 1870. Demostró que las enfermedades vinculadas al consumo de estas bebidas son causadas por microorganismos que pueden ser matados mediante la elevación de la temperatura durante varios minutos ([Priest & Stewart, 2006](#)).

1.3. El proceso de pasteurización

Este proceso a leves rasgos consiste en un calentamiento sutil del producto a aproximadamente 60°C y el mantenimiento de esta temperatura durante un cierto período de tiempo, con el fin de inactivar o eliminar los microorganismos potencialmente nocivos. El proceso busca estabilizar el producto sin generar variaciones severas a sus características organolépticas ([Dilay et al., 2006](#)). La medida de pasteurización para la cerveza es PU (Pasteurization Unit). Una unidad de PU es equivalente a que la bebida esté expuesta durante 1 min a 60°C ([Alami et al., 2014](#)).

Dado que la cerveza contiene antimicrobianos naturales como es el alcohol, la carbonatación y el lúpulo; aplicar una pasteurización suave es eficaz para su estabilización a

temperatura ambiente (p.ej. 20 a 120 PU) ([Silva & Gibbs, 2009](#)). Un tratamiento térmico excesivo puede causar reacciones secundarias indeseables, como la alteración del sabor o características visuales ([Silva et al., 2014](#)).

En la industria se utiliza una relación tiempo-temperatura de 15 min a 60°C, lo que equivale a 15 PU. Sin embargo pruebas de laboratorio han demostrado que los valores de PU de 1 a 5 son efectivos para la inactivación microbiana, pero generalmente se usan entre 8-30 PU para asegurar el objetivo de esterilización ([Silva et al., 2014](#)). Esto concuerda con lo mencionado por Briggs et al. (2004) en su libro “Brewing science and practice”, donde establecen que estos organismos pueden ser inactivados a una combinación tiempo-temperatura de 60°C durante 20 minutos ([Briggs et al., 2004](#)). Al igual que con los estudios de Zufall & Wackerbauer (1999) donde afirman que el valor comúnmente aplicado de 15 a 20 PU implica un factor de seguridad de tres a cuatro veces mayor a lo necesario bajo condiciones biológicas normales, donde la densidad celular es inferior al millón (10^6) de células por mililitro; asegurando que no hay necesidad de aumentar la carga de PU. Tomando en cuenta esto, la elección de un valor de PU es siempre un compromiso entre extender la vida útil y la calidad de la cerveza.

1.4. Las técnicas de pasteurización

Gracias a los estudios de Louis Pasteur, el consumo de esta bebida cambió por completo. Para finales del siglo XIX la pasteurización se convirtió en una técnica bastante utilizada por la industria cervecera, llevándose a cabo en el producto ya embotellado. Sin embargo, desde los años 60, con la industrialización de este proceso y la creación de nuevos métodos, esta actividad pasó a alcanzar altos niveles de producción ([Dilay et al., 2006](#)).

En la actualidad, la elección del tratamiento térmico está ligado a la tasa de producción. Dentro de los métodos más comunes se encuentran “flash pasteurization” o

pasteurización instantánea (primero se pasteuriza el líquido y después se lo envasa asépticamente); pasteurización en túnel (después de que el líquido se encuentre en su recipiente, botella o lata, se lo pasteuriza a través de rociadores de agua a diferentes temperaturas); o pasteurización por lote en baño de agua (una vez embotellado el producto este pasa a sumergirse en una piscina de agua a la temperatura de pasteurización) ([Buzrul, 2004](#)).

Nuevas tendencias en el consumo de cervezas artesanales y especializadas, han desencadenado que los consumidores cada vez sean más exigentes con respecto a la calidad nutricional y sensorial de la cerveza ([Alami, Ramsey & Silva, 2016](#)). Debido a esto, ha sido motivo de investigación nuevas alternativas de pasteurización no térmicas como ultrasonido, procesamiento a alta presión (HPP “high-pressure processing”), pulsos eléctricos (PEF “pulsed electric fields”), aplicación de CO₂ e irradiación de luz ultravioleta. (Dagan & Balaban, 2006; Fischer, Schoeberl, Russ, & Meyer-Pittroff, 1999; Franchi, Atribst, & Cristianini, 2011; Mezui & Swart, 2010).

1.5. Efectos y consideraciones de la pasteurización

La mayoría de las cervezas se pasteurizan después del proceso de envasado para lograr la estabilidad microbiológica e inactivar las levaduras. De esta forma se garantiza que el producto final no esté en contacto con más fuentes de contaminación ([Reveron et al., 2003](#)). Para la industria cervecera, las bacterias de deterioro son problemáticas. Entre las más comunes presentes en esta bebida, se las puede clasificar en dos subgrupos: Gram-positivo donde se encuentran *Lactobacillus brevis*, *Lactobacillus lindneri* y *Pediococcus damnosus*; y bacterias Gram-negativo, tales como *Pectinatus cerevisiiphilus*, *Pectinatus frisingensis* y *Saccharomyces cerevisiae*. Si estos organismos son destruidos, la cerveza puede durar varios meses ([Silva et al., 2014](#)).

Saccharomyces cerevisiae es una levadura utilizada para la elaboración de cerveza y es en la mayoría de casos el microorganismo más abundante después de la fermentación y antes de la pasteurización ([Reveron et al., 2003](#)). La actividad de *S. cerevisiae* puede causar cambios sensoriales en la cerveza mediante la liberación de etanol y dióxido de carbono ([Carrau et al., 2015](#)). Las ascosporas de este microorganismo son 4 veces más resistentes a tratamientos térmicos que las células vegetativas en cervezas de 4% alc / vol, por lo que la inactivación total de las ascosporas también inactivará las células vegetativas. Existe menor resistencia de las bacterias a tratamientos térmicos con cervezas de mayor contenido alcohólico ([Milani et al., 2015](#)).

1.6. Selección de la empresa

En los últimos años la empresa seleccionada para el estudio, ha incorporado las técnicas de pasteurización dentro de su proceso de producción con el fin de estabilizar su producto y asegurar la calidad de este. Sin embargo, en este periodo la empresa ha presentado inestabilidad en el proceso. En el presente trabajo, se utilizaron herramientas de diseño de experimentos para analizar las causas que estaban influyendo directamente en la cantidad de merma de producto durante el proceso de pasteurización. Este problema implica pérdidas económicas para la empresa debido a inconvenientes de sellado de las chapas en los envases de vidrio y la ruptura de estos.

1.7. Objetivo del proyecto

El objetivo general fue cuantificar el porcentaje de merma que presentaba la empresa, para mediante la metodología de diseño de experimentos y la aplicación de un método de superficie de respuesta llegar a una solución óptima que reduzca el porcentaje de merma durante el proceso de pasteurización. A su vez se plantearon objetivos específicos, los cuales buscaban reducir los costos relacionados al proceso de pasteurización, identificar factores

externos o condiciones que estén afectando al proceso y encontrar una combinación que permita satisfacer las necesidades del cliente.

2. Métodos y materiales

2.1. Reconocimiento y medición del problema

Con el fin de cuantificar la situación de la empresa, se decidió empezar levantando un registro que permita saber de manera exacta que es lo que está pasando durante el proceso de pasteurización y cuanto estaba perdiendo la empresa debido a la merma de producto. Para esto, se calculó el tamaño de muestra ideal para cada tipo de cerveza producida en función de la capacidad mensual de producción de la planta (N), un nivel de confianza de $\alpha=0.05$ y una proporción esperada de $p=0.05$ (Ecuación 1).

$$n = \frac{N * Z_{\alpha}^2 * p * q}{d^2 * (N - 1) * Z_{\alpha}^2 * p * q} \quad (1)$$

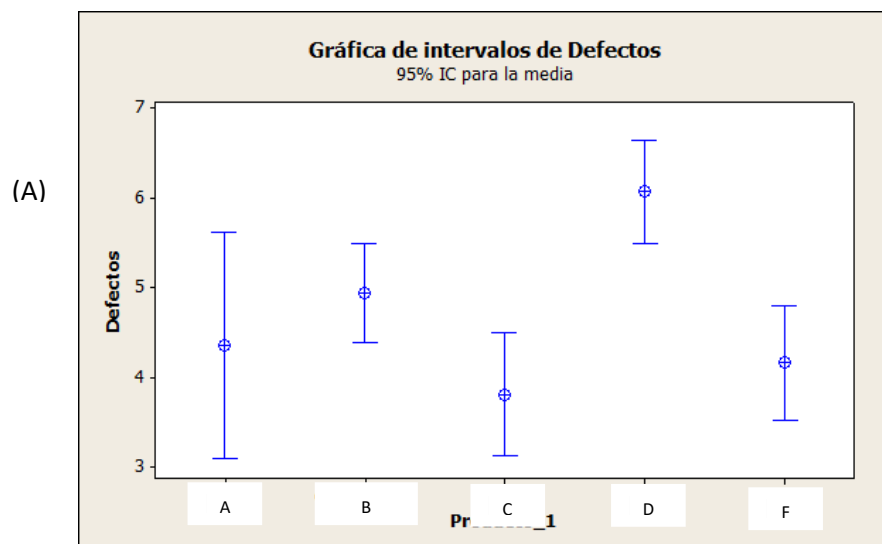
Pese a que el cálculo establecía que se debían analizar 375 botellas de cada tipo de cerveza para poder inferir en la población; la cantidad de botellas analizadas fue mayor (Tabla 1). El resultado de este reconocimiento durante los meses de enero a abril del 2017 dio un total de 8472 botellas analizadas de las cuales 6850 salieron aptas para la venta y 1622 presentaron algún tipo de problema. Esa cantidad de merma representa el 19.15% de la producción y se descompone en 10.85% de botellas que pierden su chapa y 8.3% de botellas que presentan pérdida total durante el proceso de pasteurización. Este porcentaje implica una pérdida económica anual significativa para la empresa.

Tabla 1: Resumen del número de jabas analizadas por tipo de producto

Producto	# de Jabas
A	20
B	112
C	37
D	113
E	37
Total	319

Esta fase además de permitir cuantificar la cantidad de merma y lo que implica este problema en términos monetarios, el reconocimiento permitió conocer y descartar ciertas opiniones que se tenía acerca del proceso tales como:

- Con un intervalo de confianza del 95% no existe evidencia estadística de que la cantidad de merma difiera según el tipo de cerveza (Figura 1 A).
- Con un intervalo de 95% de confianza existe una diferencia significativa en el promedio de defectos según la posición en la que se encuentre el producto dentro del tanque de pasteurización. (Figura 1 B).
- El lote del día no es un factor significativo en la cantidad promedio de defectos, por lo que se podría decir que el orden o etapa del día no influye en el resultado (Figura 1 C).



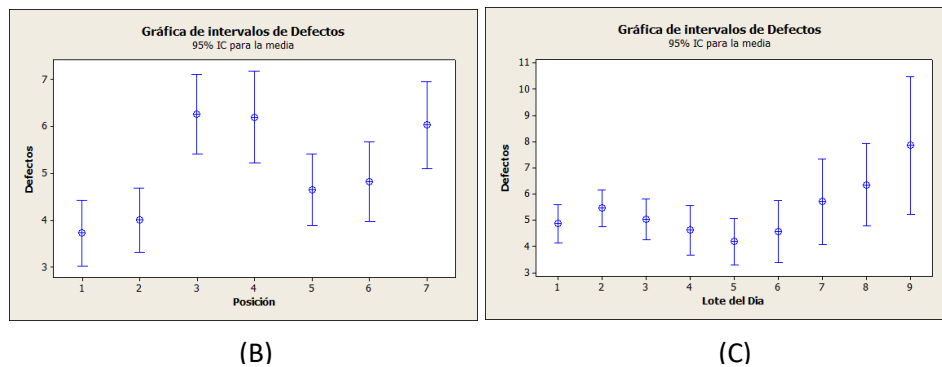


Fig. 1: Gráfica de intervalos de defectos según tipo de producto (A), posición en el tanque (B) y lote del día (C).

2.2. Diseño experimental

La metodología de superficie de respuesta (MSR), es un conjunto de técnicas matemáticas y estadísticas de diseño de experimentos (DOE). Estas son útiles en el modelado y el análisis de problemas en los que una respuesta se ve influenciada por diversas variables y donde el experimentador intenta entender mejor la región de interés y optimizar la respuesta ([Montgomery, 2013](#)).

Lo que diferencia a una ecuación de superficie de respuesta y la ecuación de un diseño factorial es la adición de los términos cuadráticos, los cuales permiten modelar la curvatura de la superficie de respuesta. Determinar esta curvatura es de interés para el experimentador ya que le permite entender o mapear cómo los cambios en los diferentes niveles de los factores afectan a la variable de respuesta. Además de poder encontrar la combinación del nivel de cada factor que optimice la respuesta o simplemente que satisfaga las condiciones operativas para el experimentador ([Minitab Inc, 2017](#)).

2.3. Selección de los factores de estudio

En base a la revisión literaria y el análisis hecho durante el proceso de reconocimiento, se logró determinar qué factores son los que podrían tener un efecto en la variable de respuesta y cuales se los podía descartar. Como anteriormente se mencionó, la base de la pasterización es una combinación entre tiempo y temperatura, donde se puede llegar a obtener los mismos niveles de inactivación de microorganismos mediante diferentes combinaciones de estas dos variables. Por lo tanto, se tomó como factores separados a tiempo y temperatura con el fin de analizarlos por solitario. En el caso de temperatura se tomó como nivel bajo 62°C debido a que por debajo de los 60°C no se da la inactivación y como nivel alto 66°C debido al límite permitido por la empresa. En el caso de la variable tiempo se tomó como nivel bajo 5 minutos y nivel alto 15 minutos.

Por último, la tercera variable es la temperatura inicial a la que ingresan las botellas al pasteurizador. Esta variable gobierna la tasa de fracaso de las botellas ya que según el libro “Pre elaboración y conservas culinarias” menciona que si se trata de pasteurizar líquidos, el material más delicado es el vidrio, ya que este puede sufrir roturas de envase por choque térmico. El autor establece que el vidrio no aguanta diferencias de temperatura superiores a 20°C al calentarse y superiores a 10°C al enfriarse ([Vertice, 2009](#)). Partiendo de que las botellas se encuentran a una temperatura ambiente cercana 20°C, teóricamente la tasa de ruptura de los envases aumentaría ante temperaturas superiores a los 40°C. Sin embargo, como la empresa venía manejando un esquema de trabajo en el que se aplicaban temperaturas de inicio mayores a 62°C debido al tipo de método utilizado, la elección de los niveles buscaba encontrar ante qué tendencia mejoraba el problema sin tener que recurrir en gastos económicos significativos. Por lo tanto, se determinó 60°C como nivel bajo y 64°C como nivel alto, con el fin de encontrar ante qué tendencia disminuía el inconveniente.

Tabla 2: Resumen de los factores y sus niveles

Factor	Nivel Bajo	Punto central	Nivel Alto
Temperatura	62°C	64°C	66°C
Tiempo	5min	10min	15min
Temperatura Inicial	60°C	62°C	64°C

2.4. Variables de respuestas

En función de encontrar una forma de cuantificar y analizar el efecto de los diferentes niveles de cada factor se decidió examinar el problema desde tres perspectivas. Para cada perspectiva se decidió escoger una variable de respuesta diferente que permita llegar a conclusiones válidas. Estos tres enfoques serían: porcentaje de merma por corrida (lote de producto), costo de realizar la corrida y tasa de inactivación de microorganismos.

2.4.1. Porcentaje de merma por corrida

Estaba claro que el objetivo principal del proyecto era reducir el porcentaje de merma de producto durante el proceso de pasterización. Por lo tanto, la primera variable de respuesta escogida fue la forma de cuantificar esa pérdida. La merma de producto como se puede ver en la (Ecuación 2) se descompone en dos partes, la primera es la cantidad de botellas rotas después de realizar una corrida, y la segunda es la cantidad de botellas rotas; todo esto dividido para el total de botellas ingresadas al tanque de pasteurización. En el caso de las botellas abiertas solo se contabilizan aquellas que hayan perdido su chapa (tillo) y el líquido interior, pero el envase de vidrio no ha sufrido ningún cambio (puede volverse a utilizar). A diferencia del conteo de botellas rotas las cuales han presentado una pérdida total debido a la pérdida de líquido, chapa y ruptura del envase.

$$\% \text{ de merma} = \frac{\text{total de botellas abiertas} + \text{total de botellas rotas}}{\text{total de botellas producidas}} \quad (2)$$

2.4.2. Costo de realizar la corrida

La segunda variable de respuesta buscaba identificar y comparar el costo de producción de cada corrida de pasteurización. Como se ve en la (Ecuación 3) el costo de producción parte de dos rubros: el costo de funcionamiento y el costo de merma. El costo de merma abarca la cantidad que pierde monetariamente la empresa por la pérdida de producto, ya sea por botellas rotas o por el coto de botellas abiertas, como se ve en la (Ecuación 4). Mientras que el costo de funcionamiento (Ecuación 5) considera cuánta energía eléctrica ha consumido la máquina en el proceso de pasteurización, multiplicado por la tarifa energética específica de la zona.

$$\text{Costo de producción} = \text{Costo de funcionamineto} + \text{costo de merma} \quad (3)$$

$$\text{Costo de merma} = (\text{botellas abiertas} * \$\$) + (\text{botellas rotas} * \$\$\$) \quad (4)$$

$$\text{Costo de funcionamiento} = \text{Energía [kWh]} * \text{Tarifa energética [$/kWh]} \quad (5)$$

$$\text{Energía [kWh]} = \text{Voltaje[V]} * \text{Corriente[A]} * \text{tiempo[h]} \quad (6)$$

Para el cálculo de las variables de corriente se utilizó un amperímetro de tenaza marca Amprobe® y para determinar el voltaje de funcionamiento se revisó la ficha técnica de la máquina.

2.4.3. Tasa de inactivación de microorganismos

Uno de los motivos más importantes de someter a un producto a un proceso de pasteurización es la inactivación de microorganismos perjudiciales. Por lo que se podría identificar la concentración de células antes y después de someter el producto al proceso térmico mediante una cámara de recuento celular “Thoma”. Sin embargo el costo de laboratorio para analizar las muestras superaba el presupuesto del proyecto, por lo que se decidió calcular la capacidad de inactivación de otra forma. En un estudio realizado por Zufall & Wackerbauer (1999) analizaron el impacto biológico de la pasteurización de cerveza en diferentes intervalos de tiempo/temperatura y como ésta afectaba a diferentes microorganismos, dando como resultado un factor de corrección para la ecuación planteada por Del Vecio en 1955. Por lo tanto, sabiendo qué microorganismo se busca inactivar (*S. cerevisiae*) y qué rango de temperatura se va a aplicar (60 - 72°C); para esto se puede utilizar la siguiente ecuación:

$$PU = t * 1.393^{(T-60)} \quad (7)$$

Donde T es la temperatura a la cual se está calentando la cerveza y t es el tiempo que ha permanecido a dicha temperatura.

2.5. Elección del diseño experimental

Partiendo de que los factores seleccionados contaban con variables continuas y que la naturaleza del problema implicaba buscar una superficie de respuesta que permita llegar a un valor óptimo; el modelo seleccionado fue un diseño central compuesto CCD (Central Composite Design). Un diseño CCD permite encontrar una aproximación adecuada de la verdadera relación funcional entre y y el conjunto de variables independientes (Montgomery, 2013). El diseño seleccionado parte de un factorial 2^3 con 4 puntos centrales más 6 puntos axiales y 2 puntos híbridos, dando un total de 20 corridas, las cuales fueron divididas en 3

bloques con el fin de reducir el efecto de factores perturbadores durante el experimento. El orden de corridas aleatorizado se lo puede ver en el (Anexo A).

Para el análisis estadístico de los tratamientos se usó el software Minitab versión diecisiete con la finalidad de determinar qué factores o interacciones tienen efecto en las diferentes variables de respuesta tanto de manera individual como en conjunto, a través de la función de deseabilidad. El modelo completo esperado se ve representado en la (Ecuación 8), donde están presentes todos los términos implicados en el modelo. Sin embargo se puede llegar a un modelo reducido para cada variable de respuesta, tomando en cuenta solo los términos que son significativos para cada una ([Myers et al., 2016](#)).

$$y = \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \beta_{12} x_1 x_2 + \beta_{13} x_1 x_3 + \beta_{23} x_2 x_3 + \beta_{123} x_1 x_2 x_3 + \beta_{11} x_1 x_1 + \beta_{22} x_2 x_2 + \beta_{33} x_3 x_3 + \varepsilon \quad (8)$$

2.6. Función de Deseabilidad

Con el fin de analizar en conjunto las tres variables de respuesta propuestas, se utilizó la función de deseabilidad, mediante la cual, sin importar el objetivo, ya sea maximizar o minimizar cada variable de respuesta, se puede llegar a un resultado óptimo. La función de deseabilidad se compone en dos partes: la deseabilidad individual y la compuesta.

La deseabilidad individual (d_i) evalúa las diferentes configuraciones y las codifica en función de cual optimiza la respuesta. Por lo que se busca transformar cada y_i en un d_i que se va a encontrar dentro del rango de $0 \leq d_i \leq 1$ ([Myers et al., 2016](#)).

$$d_i = \begin{cases} d_i = 0 & \text{Si } y_i \text{ está fuera de la región aceptable} \\ d_i = 1 & \text{Si } y_i \text{ está en su objetivo} \end{cases} \quad (9)$$

La deseabilidad compuesta (D) determina la forma en que la estructura optimiza un conjunto de respuestas específico. La deseabilidad puede tomar valores entre 0 a 1, siendo

uno la situación óptima y cero indica que una o más respuestas no están en los rangos aceptables. Myers et al. (2016). Para determinar la deseabilidad compuesta se utilizó la ecuación 10, donde m es el número de respuestas, y d_i las deseabilidades individuales (Myers et al., 2016).

$$D = (d_1 \cdot d_2 \dots d_m)^{1/m} \quad (10)$$

2.7. Procedimiento para la toma de datos

Una vez claro el orden en el que se debían realizar las corridas que asegurarían la aleatoriedad del experimento, se planteó una serie de pasos a seguir que garantizaría que las veinte corridas se las realizara bajo las mismas condiciones. El proceso para la toma de datos presentado en la figura 2 empezaba desde la preparación de las jabas plásticas y el seteo de la temperatura del tanque de pasteurización según las especificaciones de cada corrida, hasta alcanzar la temperatura objetivo y el inicio del cronómetro con el tiempo de inactivación.

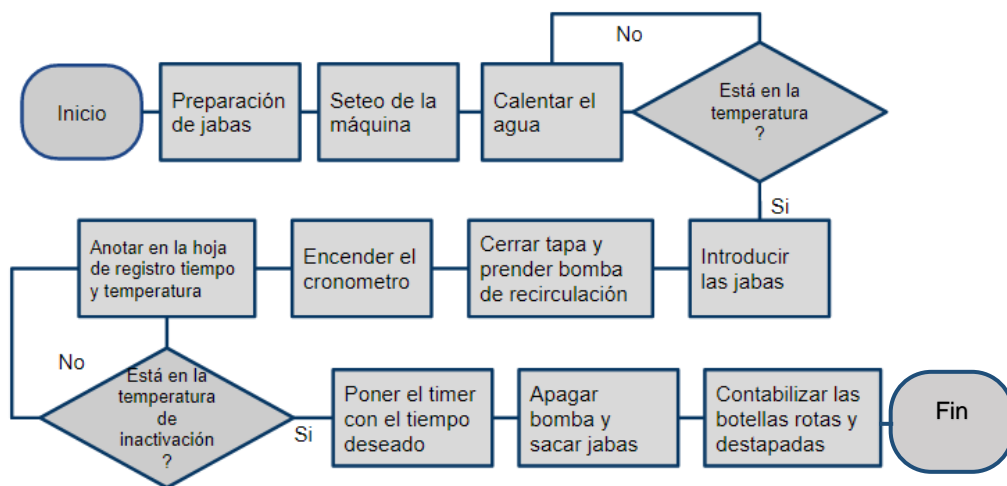


Fig. 2: Procedimiento para la toma de datos

3. Resultados y discusión

3.1. Cumplimiento de supuestos

Para empezar el análisis estadístico, como primer paso se comprobó los supuestos de normalidad, aleatoriedad e igualdad de varianzas para cada una de las tres variables de respuesta. Los supuestos de normalidad, aleatoriedad e igualdad de varianzas se muestran en las Figura 3 A, B y C presentada a continuación.

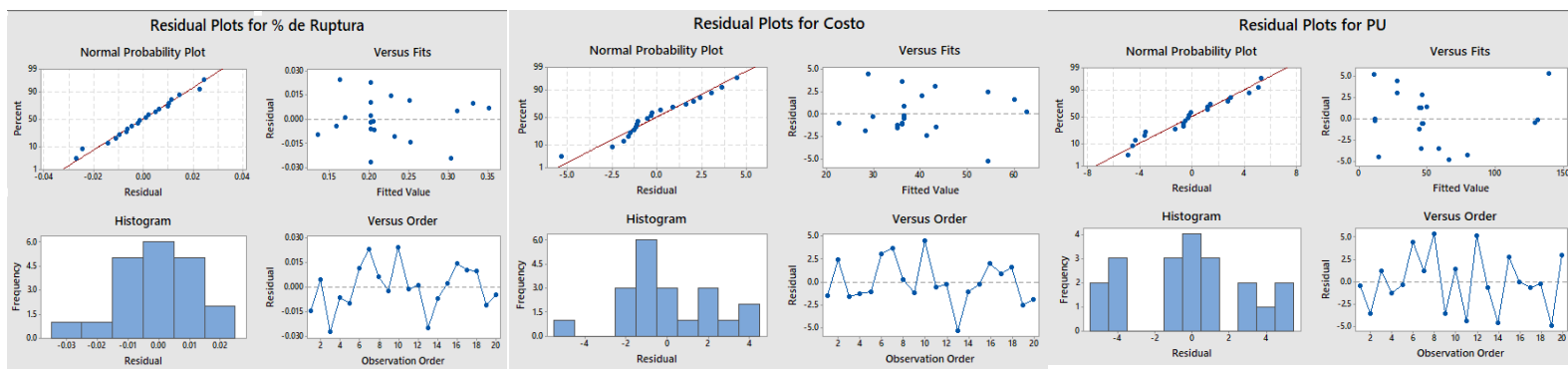


Fig. 3: Gráficas de normalidad, aleatoriedad e independencia de los residuales para las variables de respuesta, % de merma (A), Costo de realizar la corrida (B) y Tasa de inactivación de microorganismos (C).

3.1.1. Supuesto de Normalidad

En el gráfico de probabilidad normal, se puede observar que la mayoría de los residuales se encuentran sobre la línea central, por lo que el supuesto de normalidad de los residuales, tanto para la variable “% de merma” como para “Costo de realizar la corrida” si se cumple. Sin embargo, para la variable “Tasa de inactivación de microorganismos” se puede observar que los datos no siguen una distribución normal. Por esta razón, se realizó una transformación de Johnson de modo que los datos sigan una distribución normal al aplicar la función de transformación de Johnson planteada por el software (Ecuación 11). Se trabaja con esos valores de la variable de respuesta para el análisis de varianza del modelo.

$$-0.0651723 + 0.318552 \times \operatorname{Asinh}\left(\frac{X - 46.0103}{3.24770}\right) \quad (11)$$

3.1.2. Independencia de los Residuos

En el gráfico de los residuales vs. el orden de observación, se puede notar que no existen tendencias ni patrones en los datos de ninguna de las tres gráficas. Esto significa que los residuales son aleatorios y por ende se confirma que el supuesto de independencia de los residuales si se cumple.

3.1.3. Supuesto de Igualdad de Varianzas

En el gráfico de los residuales vs. el valor predicho, se puede observar que la varianza entre cada punto es aproximadamente constante. Además, la dispersión de los residuales no es muy notoria. Por lo que el supuesto de igualdad de varianzas si se cumple para las tres diferentes variables de respuesta.

3.2. Porcentaje de merma por corrida

Una vez cumplidos los supuestos, se realiza un primer modelo del diseño. Este primer modelo para el porcentaje de merma dio como resultado un modelo cuadrático ($p < 0.05$) con un coeficiente de determinación ajustado de 89.06% para las variables de proceso: Temperatura y Temperatura Inicial. La variable tiempo resultó ser no significativa. Este modelo se reduce a un modelo solamente con los factores significativos, donde el factor más significativo es la Temperatura seguido de la Temperatura Inicial con valores de F muy cercanos de 50.79 y 47.88 respectivamente. El modelo de regresión obtenido fue (Ecuación 12), el cual pasa a tener un coeficiente de determinación ajustado de 85.87% y un coeficiente de predicción de 77.86%.

$$\begin{aligned} \% \text{ de ruptura} & \quad (12) \\ & = 26.68 - 0.891\text{Temperatura} + 0.02155\text{Temperatura Inicial} \\ & \quad + 0.00714\text{Temperatura}^2 \end{aligned}$$

Esta medición es de importancia puesto que el principal motivo por el cual se está generando la pérdida de producto está ligado a la temperatura de inactivación y la temperatura del agua a la cual se empieza a ingresar las jabas. A partir de la experimentación y el análisis de las gráficas de contorno (Anexo B), se logró determinar que existe mayor pérdida de producto durante la pasterización, cuando existen niveles altos de temperatura tanto inicial como de inactivación.

3.3. Costo de realizar la corrida

El análisis de varianza del modelo de superficie de respuesta permitió establecer que la temperatura de inactivación y la temperatura inicial tienen un marcado efecto sobre esta variable de respuesta. Al igual que la variable de respuesta “% de merma”, esta presenta como significativa la interacción cuadrática de la temperatura, lo que implica la presencia de curvatura en superficie de respuesta. El modelo de regresión obtenido fue la (Ecuación 13) donde el coeficiente de determinación ajustado fue de 85.68% y el coeficiente de predicción de 77.98%.

$$\begin{aligned} \% \text{ de ruptura} & & (13) \\ & = 4575 - 153.5\text{Temperatura} + 3.911\text{Temperatura Inicial} \\ & + 1.231\text{Temperatura}^2 \end{aligned}$$

Al analizar tanto la gráfica de superficie como la de contornos para esta variable (Anexo B), se observa que la variable presenta costos más bajos al utilizar combinaciones de temperatura de inactivación y temperatura inicial más bajas.

3.4. Tasa de inactivación de microorganismos

Los resultados obtenidos para la tasa de inactivación de microorganismos varían entre 10 a 144.99PU. El modelo matemático obtenido (Ecuación 14) presenta como no significativas a las variables cuadráticas ni interacciones entre factores. Es decir que el

modelo solo se ve afectado por los factores de primer orden Temperatura de inactivación y Tiempo en ese orden de significancia. Lo cual concuerda con la premisa planteada, ya que la tasa de eliminación de microorganismos solo se ve afectada por el tiempo y la temperatura.

$$\begin{aligned} \textit{inactivación de microorganismos} & \qquad \qquad \qquad (14) \\ & = -26.85 + 0.4082 \textit{ Temperatura} + 0.0718 \textit{ Tiempo} \end{aligned}$$

El modelo de regresión reducido (Ecuación 14) pasó a tener un coeficiente de determinación ajustado de 89.28% y un coeficiente de predicción de 84.41% el cual es el más alto de las tres variables de respuesta. Cabe resaltar que tanto en esta variable como en las dos anteriores se presentaron valores de falta de ajuste no significativos, lo que implica que los modelos han podido describir de manera adecuada la relación entre los factores experimentales y las variables de respuesta ([Minitab Inc, 2017](#)).

3.5. Función de deseabilidad

A partir de esto, con el algoritmo de deseabilidad se obtuvo las posibles respuestas óptimas, donde se decidió analizar las mejores respuestas desde tres puntos de vista diferentes:

El primero buscaba minimizar tanto el porcentaje de merma como el costo de realizar la corrida mientras que buscaba maximizar la tasa de inactivación de microorganismos, puesto que aplicar una mayor cantidad de PU garantiza la seguridad biológica del producto ([Zufall & Wackerbauer, 1999](#)). El resultado para esta optimización dio como consecuencia una deseabilidad compuesta de 0.8031, lo que implica utilizar una combinación ideal de 64.89 °C temperatura, aplicar un tiempo de 18.16 min y ingresar las botellas a una temperatura de 58.73°C.

El segundo al igual que el anterior implicaba minimizar tanto el porcentaje de merma como el costo de realizar la corrida, sin embargo con respecto a las unidades de pasteurización que se debían aplicar se encontró que los valores más empleados por la industria van desde 8-30 PU para asegurar el objetivo de esterilización ([Silva et al., 2014](#)). Por lo tanto, se buscó un valor medio en ese rango y se decidió llegar al objetivo de 20PU. La combinación que permitía estas cláusulas fue utilizar una temperatura de 62.39°C aplicar un tiempo de 8.63min y manejar una temperatura inicial de 58.73°C.

La tercera opción, a diferencia de las anteriores, solo cambiaba el objetivo de unidades de pasteurización que se quiere alcanzar. Según 15 PU Bhuvanewari y Anandharamakrishnan en su estudio realizado en 2014 sobre el análisis de transferencia de calor en botellas de vidrio durante la pasteurización de cerveza, establecen que aplicando 15PU es suficiente para lograr la inactivación microbiana ([Bhuvanewari & Chinnaswamy, 2014](#)). La combinación que admitía estas condiciones fue la de utilizar una temperatura de 62.01°C, aplicar un tiempo de 7.22min y manejar una temperatura inicial de 58.73°C.

A la final como se puede ver en la tabla 2, la mejor opción fue la combinación #2, en donde se lograba reducir el porcentaje de merma actual, mientras se reducían los costos de producción y se garantizaba una esterilización adecuada para el producto.

Tabla 2: Resumen de los resultados de deseabilidad para cada variable de respuesta según la opción de optimización.

Opción	% de merma	Costo de producción	PU
1ra	16.14%	\$28.43	109.45
2da	13.86%	\$20.46	20
3ra	12.79%	\$20.93	15

Pese a que con esas combinaciones teóricamente se tendrían los valores óptimos, en la práctica no eran factibles. Esto se debe a que la máquina solo permitía ingresar valores de temperatura enteros. Por consiguiente, se analizó cual combinación presentaba un mejor resultado utilizando solo números enteros. Tomando en cuenta esta limitación de la máquina, las combinaciones posibles se redujeron notablemente y la mejor solución teórica que se podía aplicar fue utilizar una configuración de temperatura inicial de 59°C, temperatura de inactivación de 62°C y un tiempo de inactivación de 9 minutos. Esta configuración prometía reducir el porcentaje de merma a %14.09, tener un costo de producción de \$21.65 y garantizar aplicar un total de 17.88 PU a la cerveza embotellada.

3.6. Aplicación de solución óptima en el proceso

Una vez predicho un valor teórico óptimo lo que quedaba probar era qué tan acertado era este al aplicarlo a la realidad. Se lograron correr 5 corridas utilizando esta combinación. Sin embargo, para términos de comparación solo se utilizaron tres de estas, debido a que las otras dos fueron corridas con menor cantidad de producto en el tanque y no presentaban las mismas condiciones. Lo que a priori el modelo de optimización de la función de deseabilidad prometía una mejora con respecto a la situación actual (tabla 3), al aplicarlos presentaron datos no tan alejados de los predichos. Al comparar los valores predichos versus los reales vemos que la diferencia más grande existe en la variable costo de producción donde estos difieren un 9.2% a diferencia de las otras dos que la diferencia entre la realidad y lo predicho es inferior al 5%. Sin embargo, como se puede ver en la tabla 3 al comparar los resultados de la solución óptima real con los de la configuración antigua se puede apreciar una diferencia favorable. La reducción del porcentaje de merma presentó una disminución del 4.35% y una importante reducción en costos por corrida del 44.84%, todo esto sin dejar de garantizar la estabilidad biológica del producto, la cual presenta 17.5Pu.

Tabla 3: Resumen resultados de la solución óptima

Configuración	% de merma	Costo de producción	PU
Antigua	19.15%	\$35.79	86.3
Óptima (modelo)	14.09%	\$21. 65	17.88
Óptima (real)	14.8%	\$19.63	17.5

4. Conclusiones y recomendaciones

Se logró encontrar una configuración temperatura, tiempo y temperatura inicial favorable ante los objetivos del proyecto después de haber utilizado un diseño central compuesto y un modelo de optimización multivariable, (función de deseabilidad). Al analizar las 3 variables de respuesta, el diseño experimental logró detectar significancia en los factores de temperatura, tiempo de inactivación y temperatura inicial respectivamente para cada variable. Así como la influencia de factores cuadráticos que permitieron estimar la curvatura de las variables de respuesta (% de merma y Costo de producción), ante el efecto del cambio de los niveles de sus factores significativos. La función de deseabilidad determinó una configuración ideal para el problema. Esta configuración que tomaba en cuenta las limitaciones del proceso, al ponerse en práctica tuvo resultados bastante cercanos a los predichos, dando así robustez a los modelos que presentaron coeficientes de determinación superiores al 85%.

Pese a que los métodos estadísticos empleados no permiten la demostración experimental exacta, estos fueron de gran ayuda para medir el error posible en una conclusión; y tras haber tenido un modelo robusto con una capacidad de predicción

relativamente alta entre 77.86% a 84.41%, la empresa pudo lograr una disminución de la merma de producto no conforme en el proceso de pasteurización del 4.35%, al igual que una reducción en los costos por corrida del 44.84%. Al final el proyecto no solo logró cumplir con su objetivo principal de reducir el porcentaje de merma en el proceso analizado, sino que logro aclarar, cuantificar y mejorar la situación real de la empresa. Esta mejora representa una disminución en el tiempo de pasteurización, permitiendo aumentar la cantidad de rondas diarias de 6 a 7 dentro de la jornada laboral. El conjunto de todas estas mejoras le permite tener a la empresa una reducción de costos anuales de hasta cuatro cifras, siendo un factor motivante para entrar en un proceso de mejora continua que permita llegar a niveles de merma cercanos a cero.

Como recomendación, ante posibles mejoras futuras, se sugiere tomar en cuenta lo siguiente: analizar valores más bajos de temperatura a la cual se ingresan las jabas. Puesto que tanto durante la fase de investigación como en los resultados del experimento este factor presentó una correlación directa con la tasa de ruptura de embaces, a medida que la temperatura disminuye se encuentran menos casos de unidades no conformes. Una posible solución a este problema sería la implementación de tinas de precalentamiento, las cuales ayuden a reducir el shock térmico del material. También y pese a no ser estudiado durante este proyecto debido a la falta de métodos de medición precisos, se recomienda analizar los niveles de carbonatación en la cerveza ya que estos pueden estar ligados al aumento de la presión interna del envase dando como efecto la ruptura de los mismos.

Referencias Bibliografías:

Alami, E. Alkhafaji, S., & Silva, F. (2014). *Pulsed Electric Field continuous pasteurization of different types of beers*. Elsevier Ltd., 50, 223. 2014, Septiembre 3, De www.elsevier.com/locate/foodcont Base de datos.

Alami, E., Ramsey, E. & Silva, F. (2016). *High pressure processing and thermosonication of beer: Comparing the energy requirements and Saccharomyces cerevisiae ascospores inactivation with thermal processing and modeling*. Journal of Food Engineering. 181. 35-41. 10.1016/j.jfoodeng.2016.02.023.

Bhuvanewari, E & Chinnaswamy, Anandharamakrishnan. (2014). *Heat Transfer Analysis of Pasteurization of Bottled Beer in a Tunnel Pasteurizer using Computational Fluid Dynamics*. Innovative Food Science & Emerging Technologies. 23. 10.1016/j.ifset.2014.03.004.

Briggs, E., Boulton, C., Brookes, P. & Stevens, R. (2004). *Brewing Science and practice*. Boca Raton FL: Woodhead Publishing Limited and CRC Press.

Buzrul, S. (2003). *EFFECTS OF HIGH HYDROSTATIC PRESSURE (HHP) ON QUALITY PARAMETERS AND SHELF-LIFE OF LAGER BEER*. Agosto 26, 2017, de School of Natural and Applied Sciences Sitio web: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.634.467&rep=rep1&type=pdf>

Carrau, F., Gaggero, C. & Aguilar, P.. (2015). *Yeast diversity and native vigor for flavor phenotypes*. Trends in Biotechnology, vol. 33, pp, 148-154. , De <https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2014.12.009> Base de datos.

- Dagan, G. & Balaban, M. (2006). *Pasteurization of Beer by a Continuous Dense-phase CO₂ System*. Journal of Food Science, vol 71, pp. 164–169.
- Dilay, E., Vargas, J., Amico, S. & Ordonez, J. (2006). *Modeling, simulation and optimization of a beer pasteurization tunnel*. Journal of Food Engineering, 77, pp. 500-513. 2017, Agosto 20, De www.elsevier.com/locate/jfoodeng Base de datos.
- Fischer, S., Schöberl, H., Ruß, W., & Meyer-Pittroff, R. (1999). *The effects of hydrostatic high pressure on the brewing process and beer*. In H. Ludwig (Ed.), *Advances in high pressure bioscience and biotechnology* (pp. 419e422).
- Franchi, Mark & Atribst, A.A.L. & Cristianini, Marcelo. (2011). *Effects of high pressure homogenization on beer quality attributes*. Journal of the Institute of Brewing. Vol. 117, pp. 195-19.
- Goldammer, T. (2008). *The Brewer's Handbook: The Complete Book to Brewing Beer*. U.S.: Apex Publishers.
- Hankin, L. (1988). *Analysis of Beer*. New Haven: the Connecticut Agricultural Experiment Station. <http://www.ct.gov/caes/lib/caes/documents/publications/bulletins/b865.pdf>
- Mezui, A. M., & Swart, P. (2010). *Effect of UV-C disinfection of beer sensory analyses and consumer ranking*. Journal of the Institute of Brewing, vol. 116(4), pp. 348-353.
- Milani, E., Gardner, R. & Silva, F. (2015). *Thermal resistance of Saccharomyces yeast ascospores in beers*. International Journal of Food Microbiology, vol. 206, pp. 75-80.
- , De <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S016816051500183X?via%3Dihub>.

Minitab Inc. (2017). *¿Qué son los diseños de superficie de respuesta, los diseños centrales compuestos y los diseños de Box-Behnken?*. Agosto 26, 2017, de Soporte de Minitab® 18 Sitio web: <https://support.minitab.com/es-mx/minitab/18/help-and-how-to/modeling-statistics/doe/supporting-topics/response-surface-designs/response-surface-central-composite-and-box-behnken-designs/>

Minitab Inc. (2017). Tabla Resumen del modelo para Analizar diseño de superficie de respuesta. Diciembre 7, 2017 , de menu Soporte de Minitab® 18 Sitio web: <https://support.minitab.com/es-mx/minitab/18/help-and-how-to/modeling-statistics/doe/how-to/response-surface/analyze-response-surface-design/interpret-the-results/all-statistics-and-graphs/model-summary-table/>

Montgomery, D. (2013). *Analysis and Design of Experiments*. Danvers: John Wiley & Sons, Inc.

Montgomery, D. (2013). *Introduction to Statistical Quality Control*. United States of America: John Wiley & Sons, Inc.

Myers. R, Montgomery. D, Anderson-Cook. C. (2016). *Response Surface Methodology*. Wiley: Hoboken.

Priest, F. Stewart, G. (2006). *History of Industrial brewing*. En Handbook of Brewing, Second Edition (pp. 12-13). United States: Taylor & Francis Group. https://books.google.com.ec/books?id=Ut3LBQAAQBAJ&printsec=frontcover&source=gbs_ViewAPI&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false

Reveron, I., Barreiro, J. & Sandoval, A. (2003). *Thermal Resistance of Saccharomyces cerevisiae in Pilsen Beer*. Journal of the Institute of Brewing, vol. 109(2), pp. 120–

122. , De <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/j.2050-0416.2003.tb00140.x/pdf>

Base de datos.

Silva, F. & Gibbs, P. (2009). *Principles of Thermal Processing: Pasteurization*. Engineering Aspects of Thermal Food Processing, Edition: Contemporary Food Engineering Series, Chapter 2, pp. 13-48. , De https://www.researchgate.net/publication/262314128_Principles_of_Thermal_Processing_Pasteurization Base de datos.

Silva, F., Gibbs, P., Almonacid, S. & Simpson, R. (2014). *THERMAL PROCESSES / Pasteurization*. Encyclopedia of Food Microbiology. 577-595. 10.1016/B978-0-12-384730-0.00404-3.

Vértice. (2009). *Equipos de pasteurización*. En Preelaboración y conservación culinarias (p.125). España: Editorial Vértice S.L..

Zufall, C. & Wackerbauer, K. (1999). *The Biological Impact of Flash Pasteurization Over Wide Temperature Interval*. Institute of Brewing and Distilling, vol 106, pp.163-168. 2017, Agosto 20, De www.ibd.org.uk Base de datos. <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/j.2050-0416.2000.tb00053.x/pdf>

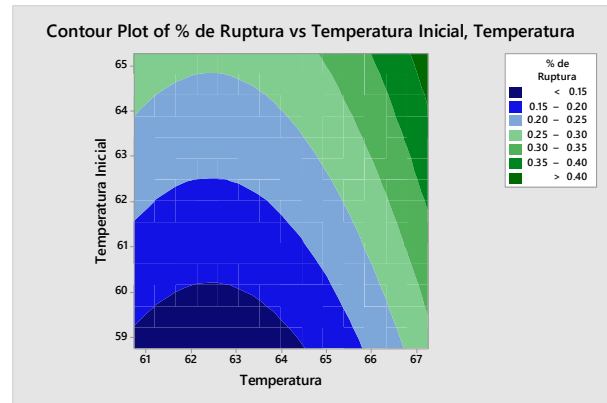
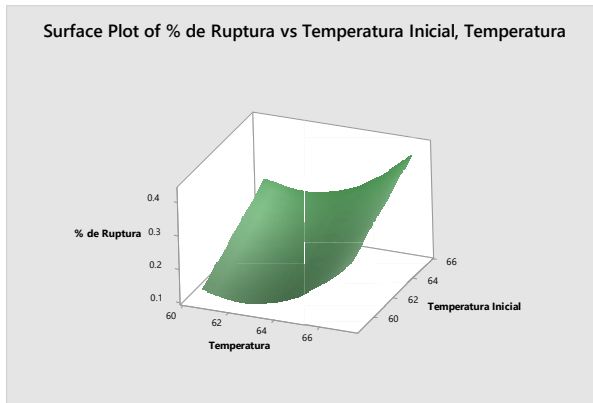
Anexos:

ANEXO A. Tabla del orden de corridas del experimento y combinaciones de factores para cada una.

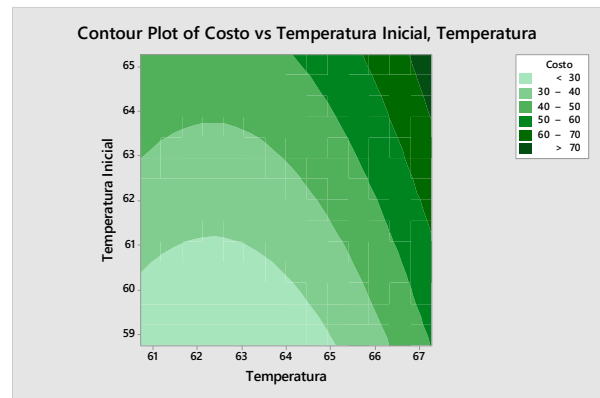
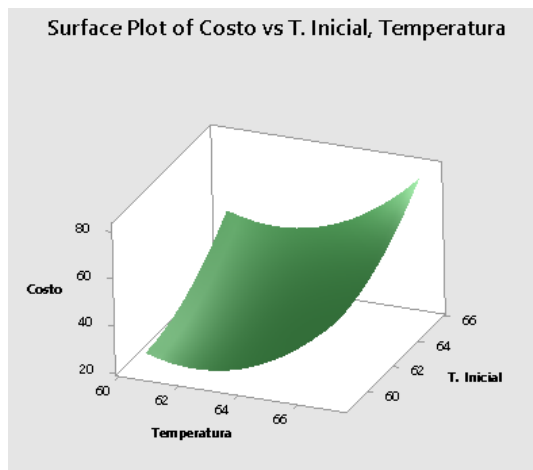
StdOrder	RunOrder	Blocks	Factores		
			Temperatura	Tiempo	Temperatura Inicial
2	1	1	66	15	60
3	2	1	66	5	64
6	3	1	64	10	62
5	4	1	64	10	62
1	5	1	62	5	60
4	6	1	62	15	64
20	7	3	64	10	62
14	8	3	67.3	10	62
19	9	3	64	10	62
17	10	3	64	10	58.7
16	11	3	64	18.17	62
15	12	3	64	1.84	62
18	13	3	64	10	65.3
13	14	3	60.7	10	62
11	15	2	64	10	62
9	16	2	62	5	64
12	17	2	64	10	62
10	18	2	66	15	64
7	19	2	66	5	60
8	20	2	62	15	60

ANEXO B: Superficies de respuesta y gráficas de contorno de las variables estudiadas. A) % de merma B) Costo de producción C) Inactivación microorganismos (PU)

A)



B)



C)

