

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE VALPARAÍSO
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA



PROYECTO PARA OPTAR AL TITULO DE INGENIERO CIVIL
QUIMICO

**ESTUDIO DE CONTROL ESTADÍSTICO DE
PROCESOS EN LA ELABORACIÓN DE LA
CERVEZA PARA CERVECERA CCU CHILE
LTDA.**

Álvaro Aguayo Almendra

Profesores Guías:
Jaime Fernández Celis
Javier Silva Campino

2011

Agradecimientos

“Nuestra gloria más grande no consiste en no haberse caído nunca, si no en haberse levantado después de cada caída” Confucio.

De cada una de estas “caídas” habría sido muy difícil levantarse de no haber contado con las personas que me ayudaron a lo largo de mis estudios. Es por esto que quisiera agradecer en primer lugar a mis padres, quienes me formaron como persona, me inculcaron el hábito del estudio y lo más importante, me dieron los valores que me definen hoy como persona.

También quisiera agradecer a mi novia y hermana por el apoyo y por la paciencia que tuvieron en las largas horas de estudio que pasé cerca de ellas.

Y por último agradecer a todo el cuerpo docente de la Escuela de Ingeniería Química, que me dieron las herramientas y conocimientos para ser un gran profesional, y en especial agradecer a mis profesores guía, Jaime Fernández y Javier Silva que me brindaron todo el apoyo y ayuda en esta última etapa mis estudios.

Muchas gracias por permitirme dar este último paso para empezar una nueva etapa.



Dedicatoria

Dedico esta tesis a alguien que aun ni se debe imaginar qué está pasando en este mundo, te lo dedico a ti, Matilda Antonia, ya pronto te podré conocer.

Resumen

La presente memoria de título tiene como finalidad establecer propuestas de soluciones a los parámetros estadístico (FTR) que entreguen una mayor cantidad de fallas, mediante un análisis de control estadístico de procesos en área de elaboración de la cerveza en la planta de CCU, Quilicura; además de entregar un resultado del estado estadístico de la planta.

De todas las variables FTR que se controlan, se consideró evaluar y analizar, el extracto original y el tiempo, para el área de cocimiento y la velocidad de fermentación para la etapa correspondiente, aun cuando bajo las normas de la aplicación de la estrategia de calidad “6 sigma”, todas las variables están, estrictamente “no controladas”, sin embargo estas son las menos controladas (o que arrojan mayor cantidad de errores por lote).

Mediante un análisis de sensibilidad al área de fermentación, se encontró que la variable más influyente es la temperatura de fermentación (22,2 % de influencia), con lo que mediante una serie de mediciones a los estanques que tenían una mayor frecuencia de errores se descubrió que los sensores de temperatura de estos estanques estaban descalibrados.

En el área de cocimiento se encontró que los tiempos patrones que utilizaban para realizar las distintas etapas de este proceso estaban algo desfasados, por lo que se juntó una serie de 67 muestras (cocimientos) equivalentes a una producción semanal, encontrándose los principales desfases en dos de los reposos de la maceración y en la generación del UADL, los tres desfases de alrededor de 27 minutos. Para esto se propuso una mejor estandarización de los tiempos por paso en cada equipo.

Luego se analizó el tiempo de enfriamiento mediante el cálculo del error integrativo al cuadrado (ISE) del sistema de control, encontrándose un valor de

alrededor de casi 17, lo cual dista mucho de lo esperado (valor entre 0 y 1). Analizando el ciclo del amoniaco (sistema de enfriamiento) se llegó a la conclusión que el tiempo óptimo de enfriamiento es de 10 [h] con un funcionamiento de los compresores de amoniaco de 4000 [KW] con lo cual se logra aumentar la producción del área de fermentación en un 60%.

Índice General

Agradecimientos.....	II
Dedicatoria.....	III
Resumen.....	IV
Índice General.....	1
Índice de Figuras.....	4
1 Introducción.....	1
1.1 Elaboración de la cerveza.....	1
1.2 Antecedentes de la empresa.....	5
1.3 Elaboración de la cerveza en CCU S.A.....	6
1.4 Objetivo General.....	13
1.5 Objetivos Específicos.....	13
2 Marco teórico.....	14
2.1 Definiciones de FTR.....	14
2.1.1 Parámetros FTR.....	15
2.1.2 Batch's FTR.....	15
2.1.3 Objetivo FTR.....	15
2.1.4 Parámetros FTR medidos en CCU.....	16
2.1.4.1 Cocimiento.....	19
2.1.4.2 Fermentación.....	20
2.1.4.3 Filtros.....	21
2.1.5 Control estadístico de proceso.....	22
2.1.6 Gráficos de control.....	23
2.1.7 Límites naturales del proceso.....	23
2.1.8 Metodología de prueba de procesos bajo control.....	24

Tabla 2.1: Tabla ejemplo de lotes con sus respectivas medidas y diferencia de rangos	24
2.1.9 Seis sigma y metodologías relacionadas.....	26
Tabla 2.2: Nivel de calidad obtenido según nivel de sigma alcanzado.....	27
3 Plan de trabajo.....	32
3.1 Medición de parámetros FTR.....	32
3.1.1 Medición de parámetros en área de cocimiento.....	32
3.1.1.1 Grado Plato.....	32
3.1.1.2 Tiempo de Proceso	33
3.1.2 Medición de parámetros en área de fermentación	34
3.1.3 Medición de parámetros en área de filtros.....	35
4 Análisis de resultados.....	36
4.1 Construcción de gráficos de control	36
4.1.1 Cocimiento:.....	36
4.1.1.1 Tiempo de Proceso	36
4.1.1.2 Grado Plato (°P)	37
4.1.2 Fermentación	39
4.1.2.1 Velocidad de Fermentación	39
4.1.2.2 Momento de Cosecha.....	41
4.1.2.3 Guarda de Levadura	42
4.1.2.4 Tiempo de Llenado	43
4.1.2.5 NBB	43
4.1.2.6 UBD	44
4.1.3 Filtro	45
4.1.3.1 O₂.....	45

4.1.3.2	CO ₂	46
4.1.3.3	Color	47
4.1.3.4	Turbidez	48
4.1.3.5	Extracto Original (E.O.)	49
5	Propuesta de soluciones	51
5.1	Área de Cocimiento	51
5.1.1	Extracto Original (°P).....	51
5.1.2	Optimización del sistema de enfriamiento para el área de fermentación	55
5.1.2.1	Análisis de Sensibilidad	55
5.1.2.2	Variable Objetivo: Temperatura de TCC	57
5.1.2.3	Optimización	58
5.1.2.3.1	Balace de Materia Amoniaco.....	59
5.1.2.3.2	Balace de Energía	60
6	Discusiones y Conclusiones	63
7	Bibliografía.....	66
Anexos	.....	67
Anexo I	.....	67
Anexo II	.....	72
Anexo III	.....	74
Anexo IV	.....	76

Índice de Figuras

Elaboración de la Cerveza; Elaboración de la cerveza en Chile;

Antecedentes de la Empresa	6
Diagrama de Flujo de Sala de Cocimiento	14
Diagrama de Flujo de Área de Fermentación	15
Diagrama de Flujo del Área de Filtros	16
de Flujo del Área de Fermentación Heineken.....	16
Gráfico ejemplo de serie de datos aplicado a la metodología seis sigma	22
Gráfico ejemplo de serie de rangos de mediciones de datos, aplicado a la metodología seis sigma.....	23
Distribución normal de un sistema no centrado (línea punteada) y sistema centrado (línea continua)	27
Diagrama de Ishikawa o causa-efecto.....	28
Ejemplo Diagrama de Pareto.....	29
Tomamuestras de mosto frio	31
Parte de la planilla de Tiempo de Proceso.....	32
Planilla FTR de Fermentación	32
Gráfico de tiempo de proceso – Control estadístico	35
Gráfico de Extracto en Mosto Frio– Control estadístico	36
Gráfico de Rango de Extracto en Mosto Frio. Control Estadístico.....	36
Gráfico de Velocidad de Fermentación [°P/Día] – Control estadístico	37
Gráfico de Rango de Velocidad de Fermentación – Control Estadístico	38
Gráfico de Momento de Cosecha. – Control Estadístico.....	39
Gráfico de Rango de Momento de Cosecha. – Control Estadístico	39

Gráfico de Guarda de Levadura. – Control estadístico	40
Tiempo de Llenado – Control Estadístico.....	41
Gráfico UBD. – Control Estadístico	42
Cantidad de O2 Contenido en Cerveza Escudo al Final del Proceso de Filtración [ppm]. – Control Estadístico	43
Cantidad de CO2 Contenido en Cerveza Cristal al Final del Proceso de Filtración. [% v/v] – Control Estadístico.....	44
Color de Cerveza Cristal al Final del Proceso de Filtración [°EBC] – Control Estadístico	45
Turbidez en Cerveza al Final del Proceso de Filtración [°EBC] – Control Estadístico	46
Extracto Original en Cerveza Cristal al Final del Proceso de Filtración. – Control Estadístico	47
Tomamuestras de Mosto Después del Intercambiador de Placas.....	52
Instrumento de Medición de Extracto	53

1 Introducción

La cerveza es una bebida alcohólica muy antigua, desarrollada por los pueblos de los imperios mesopotámicos y por los egipcios.

El origen de la Cerveza se remonta muy atrás en la historia de la humanidad. Hay quienes afirman que fue inventada antes que el pan, y que por mucho tiempo se le utilizó como alimento más que como bebida de celebración. La materia prima fundamental de la Cerveza es la cebada, un cereal de reconocidas cualidades nutritivas.

1.1 Elaboración de la cerveza

La cerveza es una bebida resultante de la fermentación alcohólica, mediante levadura seleccionada, de un mosto procedente de la malta (germinación, secado y tostado de los granos de cebada), al que se han agregado lúpulos y sometido a un proceso de cocción. Tras filtrar la cerveza, se procede a su envasado en botellas, botellines, latas o barriles.

Para conseguir ese paladar amargo que caracteriza a la cerveza, se le añade lúpulo o, más exactamente, su flor, un cono de pétalos dorados que contiene resinas y aceites aromáticos.

Su elaboración comprende los pasos de formación del mosto (cocimiento), fermentación del mosto (u obtención de la cerveza verde) y la filtración. (Fig. 1.1)

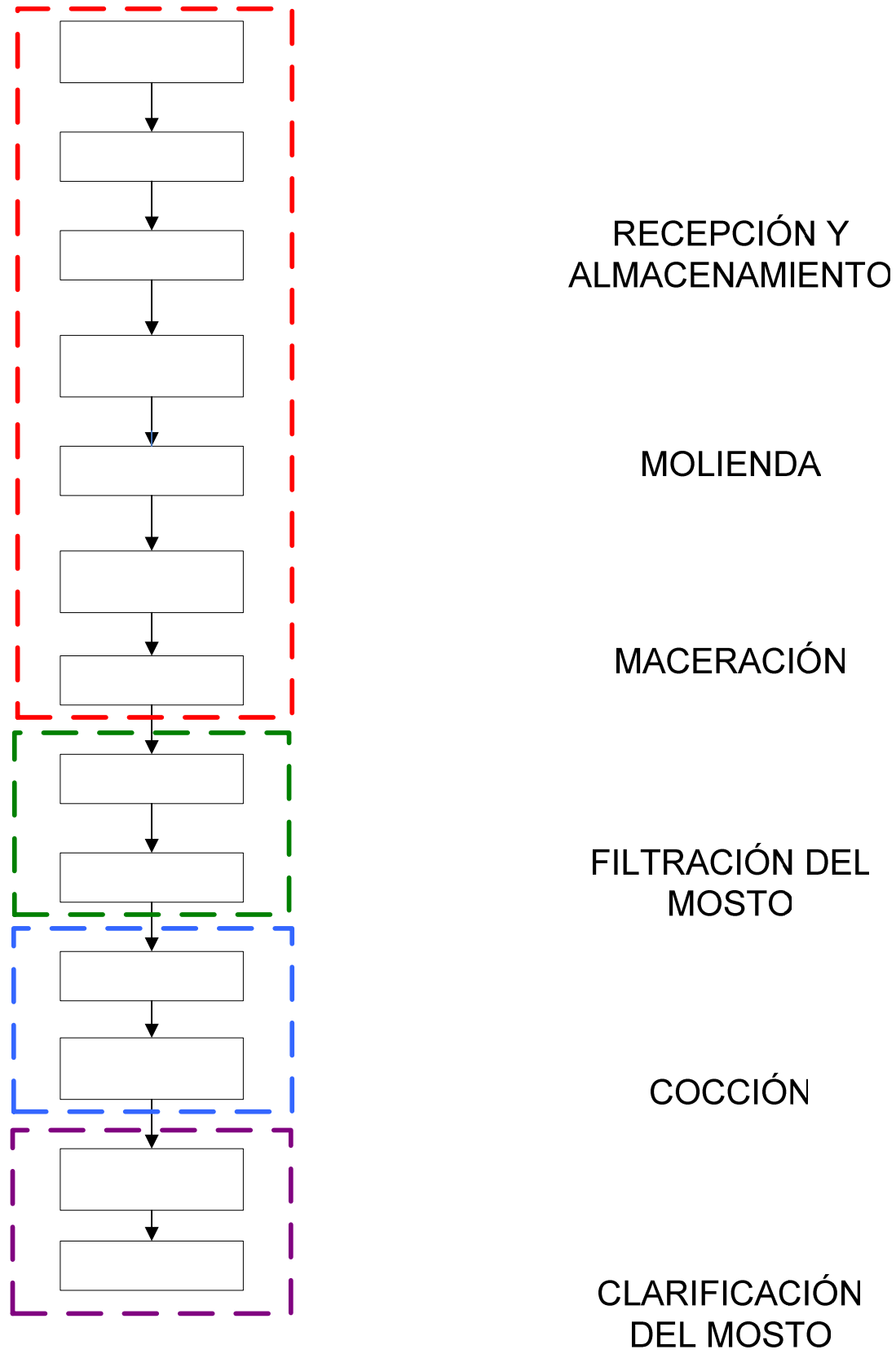


Fig. 1.1 Diagrama de Bloques Proceso de Elaboración de la Cerveza.

Estilos de Cerveza:

Lambic: Originarias de la zona flamenca del río Zenne (Bélgica), se fabrican a partir de cebada malteada y trigo crudo, utilizan cepas salvajes de levadura, lo cual provoca una fermentación espontánea. Tienen poco gas y por tanto, poca espuma. Entre sus variedades se encuentran las "gueze" de carácter achampanado; las "faro", endulzadas con azúcar candé; las "mars", versión diluida de la anterior; la "kriek lambic", elaborada con cerezas, y la "frambozen", con frambuesas.

Cervezas de trigo: Son muy refrescantes y tienen una elevada proporción de trigo añadida a la cebada. De fermentación alta, son conocidas como "blancas" porque producen una espuma muy pálida durante la fermentación. El estilo más difundido, elaborado en el sur de Alemania, es denominado en unas ocasiones "wezenbier" (cerveza de trigo) y en otras, "weissebier" (cerveza blanca). Las levaduras utilizadas en su elaboración le aportan un toque aromático balsámico y resinoso, que aumenta su efecto refrescante.

Ale: Tradicionalmente ligada a las Islas Británicas, es una cerveza de fermentación alta en caliente (de 15 a 25 °C), que proporciona al producto aromas afrutados y gran variedad de tonos y sabores. Destacan la "mild", ligera, muy pálida, con bajo contenido alcohólico; la "bitter", servida de barril, seca y lupulizada; la "pale ale", traslúcida, de color bronce o rojo ambarino además de la "india pale ale", la "brown ale", la "old ale" y las "ale" escocesas, irlandesas y belgas.

Stout: Cervezas de fermentación alta, muy oscuras y cremosas. El término "stout" (robusto) define su carácter, con acusado aroma lupulizado y acidez afrutada. Entre las "stouts" secas más populares del mundo, se encuentra la Guinness, originaria de Dublín, con quince fábricas repartidas por todo el mundo.

Porten: Su nombre procede de un pub de Londres donde se fabricaba una cerveza muy tostada y amarga, más ligera de cuerpo que la "stout". Se sirve a temperatura ambiente y su contenido alcohólico supera los cinco grados.

Lager: Cerveza de baja fermentación, guardada a una temperatura cercana a los 0 °C durante dos meses. Una vez envasada, debe consumirse lo antes posible.

Cerveza al vapor: Se conoce así una variante de "lager" californiana, en cuya elaboración se utilizan tanques de fermentación poco profundos, con lo que se logra un rápido enfriamiento del mosto al estar más en contacto con el aire. El producto obtenido contiene una alta proporción carbónica. Hoy se produce en Baviera, Gran Bretaña y California.

Cerveza ahumada: Se obtiene al tostar los granos de cebada sobre el fuego. Tiene tradición en Escocia, Alemania y Polonia. Una variante es la cerveza a la piedra, en cuyo proceso de elaboración se le introducen piedras candentes en el mosto.

Cerveza de centeno: Originaria de los países Bálticos, es elaborada con centeno, rico en calcio, hierro y vitamina E.

Degustación:

Temperatura: La cerveza lager o rubia debe servirse a seis u ocho grados. Una cerveza más fría desarrolla menos espuma, y más caliente, una espuma menos consistente.

Presentación: El recipiente de la cerveza (vaso, copa o jarra) no debe presentarse congelado, pues dificulta la formación de espuma y la apreciación visual del líquido, y a la hora de saborear una cerveza, deben de tenerse en cuenta su brillo, su transparencia y la cremosidad de su espuma.

Color y sabor: La graduación alcohólica, el amargor, el cuerpo y la temperatura determinan el sabor de una cerveza. Los colores (rubia, negra, tostada o blanca) no implican ningún sabor asociado, únicamente dependen del mayor o menor tueste del cereal durante el malteado.¹

¹ Asociación de Productores de Cerveza de Chile A.G., ACECHI.cl

1.2 Antecedentes de la empresa

CCU es una sociedad anónima abierta, cuyas acciones son transadas en los mercados bursátiles de Chile y en la Bolsa de Valores de Nueva York. Sus principales accionistas son: Inversiones y Rentas S. A. (61,6%), Sociedad dividida en partes iguales entre Quiñenco S. A., Holding del grupo Luksic y Heineken, Celfin (5%) y Banchile (2,7%); el resto de la propiedad corresponde a ADRs, inversionistas institucionales, y otros accionistas minoritarios.

CCU es una empresa diversificada de bebidas, con operaciones principalmente en Chile y Argentina. CCU es el mayor cervecero chileno, el segundo cervecero en Argentina, el tercer mayor productor de bebidas gaseosas en Chile, el segundo mayor productor de vinos, el mayor embotellador de agua mineral y néctares en Chile, uno de los mayores fabricantes de pisco y también participa en el negocio de los confites en Chile. Toda esta amplia línea de productos es distribuida a lo largo de Chile a través de su filial Transportes CCU. Adicionalmente cuenta con una unidad dedicada a la fabricación de botellas y cajas plásticas, Plasco S.A.

El variado portafolio de productos CCU incluye marcas propias, licenciadas e importadas, manteniendo contratos de licencia y/o joint ventures con Heineken Brouwerijen B.V., Anheuser-Busch Incorporated, PepsiCo Inc., Paulaner Brauerei AG, Schweppes Holdings Limited, Guinness Brewing Worldwide Limited y Société des Produits Nestlé S.A. Cuenta con más de 4300 empleados y produce anualmente más de 1.100 millones de litros de bebestibles. Con ellos atiende, sólo en Chile, a cerca de 95.000 clientes directos y llega a 10 millones de consumidores.

De sus marcas de cerveza nacionales, la primera es Escudo en 1942, seguida por Cristal, Malta Morenita, Dorada, Royal Guard y Light, Aysén, Lemon Stone. Elabora además cervezas Heineken (2003), Paulaner (1991) y embotella Budweiser (1996). Aparte de Bilz, en 1959 obtiene la licencia para producir Pepsi. En 1960 ingresa al mercado de las aguas minerales por la adquisición de Cachantun.

Además, es dueña de 50% de Cervecería Austral (2001) y Cervezas Kunstmann (2002).

1.3 Elaboración de la cerveza en CCU S.A.

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

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

El proceso comienza en esta etapa con la recepción de granos de malta cebada proveniente de distintas partes del país y del mundo; además se recibe arroz que se utiliza en el proceso.

Una vez recepcionados los granos, se continúa con su limpieza, la cual es distinta para la malta y el arroz.

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

El arroz en cambio, se almacena en silos de 500 y 275 [Ton] para después ser limpiados de impurezas metálicas y no metálicas.

Una vez completado el proceso de limpieza de granos, se comienza a dosificar el arroz y la malta por separado, mediante una balanza romana que proporciona batch's de 50 kg y 100 kg, respectivamente, para así pasar a la etapa de molienda. El arroz se somete a una molienda seca, en un molino de dos rodillos; por otro lado,

la malta se procesa en un molino de seis rodillos y además se le agrega agua a 60 °C para hacer más eficiente el proceso. Dichos molinos tiene una capacidad de 5 y 20 [ton/h] respectivamente.

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

Por otra parte, la malta se pasa directo a los maceradores, en donde se le adiciona la enzima β -glucanasa con la finalidad de romper las paredes celulares del germen de la malta y poder acceder a los azúcares del grano. Luego de esto, se procede a mezclar las soluciones de arroz y malta en los maceradores.

Esta mezcla y maceración se lleva a cabo mediante la siguiente curva de maceración.

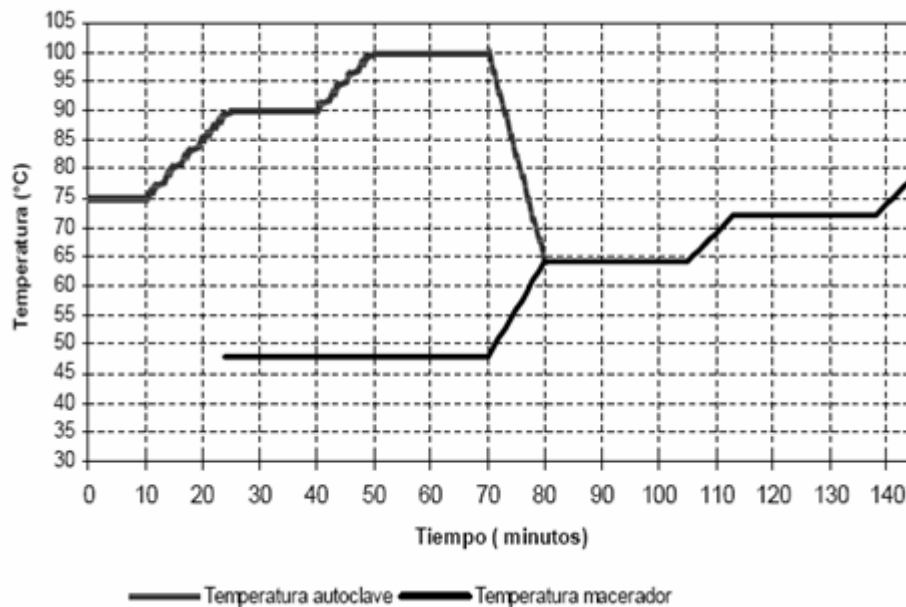


Fig. 1.2 Curvas de maceración del arroz y malta.

Esta solución que se obtiene se conoce con el nombre de caldo madre (CM). En esta planta se producen 5 tipos de CM: CM2, CM4, CM6, CM7, CM8. Cada uno de estos tipos de “caldos madre” y con un procesamiento adecuado produce una pinta distinta de cerveza, siendo destinado para la producción de Heineken solo el CM8.

De acuerdo con el CM que se haya producido, es el volumen de caldo frío que se produce para la siguiente etapa (600 ó 700 HL).

Una vez concluida la maceración, se pasa la mezcla con restos de malta (orujo, proteínas no disueltas) a la etapa de filtros. Estos filtros llamados Filtros Lauter, constan de un estanque con un fondo con orificios (fondo falso), además son agitados lentamente, mediante barras verticales en “zig-zag”. El líquido procesado se recircula, acumula y pasa a la siguiente etapa de acuerdo al programa enviado por la gerencia técnica para la producción de un CM específico. Los sólidos obtenidos en esta etapa, son retirados de los filtros una vez realizado el batch, y llevados a silos de orujo, donde posteriormente son retirados en camiones para su venta como alimento de animales.

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

A continuación se realiza la cocción del mosto, etapa en la cual mediante la adición de calor, lúpulo (sustancia que le da el sabor amargo a la cerveza) y ácido

fosfórico, se concentra el extracto (16 °P), se isomeriza el lúpulo, y esteriliza la solución. Esta etapa dura aproximadamente 70 minutos.

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

Una vez completada la etapa de Whirlpool se procede a enfriar el mosto, desde 90 °C a 10 °C aproximadamente en un intercambiador de placas.

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

Concluido esto comienza la etapa de fermentación del mosto para pasar a llamarse cerveza.

Esta etapa consta de los siguientes estanques:

Tanques Fermentadores TCC: Tanque Cilindro Cónico.

- 14 Unidades
 - Utilizado solo para HKN, eventualmente CCU.
 - 11 al 17: Cono refrigerado con capacidad de 3200 HI.
 - 21 al 27: Cono refrigerado con capacidad de 3200 HI.
 - Se llenan con 2 HORAP (2800 HI aprox)

Tanques Fermentador y Reposo UT: Uni- Tank

- 26 Unidades
 - 51 al 55: Cono aislado y 3200 HL
 - 61 al 65: Cono aislado y 3200 HL
 - 71 al 75: Cono aislado y 6500 HL
 - 81 al 85: Cono aislado y 6500 HL
 - 101 al 105 y 111: Cono aislado y 6500 HL

Estanque pequeño (3200HI): Su llenado demora de 6-7 Hrs y se receptiona 3 cocimientos. (Con alrededor de 2100 HI aprox.).

Estanque grande (6500HI): Su llenado demora de 13-15 Hrs y se receptiona 7 cocimientos, en verano 9. (Con alrededor de 4800 HI aprox.).

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

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

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

Una vez concluida la propagación antes mencionada, se procede a llenar un estanque TCC con 3 cocimientos y estanque propagador para llevar a cabo la

fermentación. Manteniendo siempre el mosto a una temperatura de 10 °C aproximadamente, se mantiene en dichos estanques por aproximadamente 7,5 días, sin embargo este no es el parámetro a medir, una vez que el grado plato (°P) baja hasta 2,8 y comienza a repetirse este valor (tres veces aproximadamente), se procede a realizar una purga de 1 HI aproximadamente para así realizar la primera cosecha de levadura que servirá para una siembra posterior en un estanque fermentador, además se extraen muestras para laboratorio para analizar las cantidades de diacetilos (butanodiona y pentanodiona) componentes que le dan mal sabor a la cerveza, y de alcoholes superiores (productos indeseables en la fermentación), hecho esto, se puede continuar con la siguiente etapa de reposo.

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

Una vez concluido su reposo, ya se puede llamar cerveza. Sin embargo ésta contiene mucho material biológico y proteínas en suspensión, por lo que debe pasar por una etapa de filtrado.

A pesar de que ya se le haya controlado la adición de lúpulo, el extracto con el que llega a esa etapa y algunas otras propiedades de sabor y color, se le ajustan nuevamente estos parámetros, mediante la adición de lúpulo, CO₂, papaína y caramelo.

En la etapa de filtrado, se hace pasar la cerveza con tierras diatomeas por un filtro de velas, el cual corresponde a un estanque que tiene en su interior una cierta cantidad de tubos formados por muchos anillos pequeños. Entre ellos es donde pasa la cerveza filtrada.

La cerveza, previamente diluida y enfriada a temperaturas bajo cero con amoníaco, según la pinta que se esté elaborando, se le inyecta la tierra en línea y es

propulsada por una bomba de caudal variable, ya que en un principio se debe formar la pre capa de tierra con un caudal determinado (975 HI/h), con cierto espesor requerido, a diferencia del caudal de filtración que es 650 HI/h.

Dependiendo de la pinta que se esté filtrando, es la etapa que continúa. Si la pinta es Heineken, Paulaner o Cristal Cero, se pasa la cerveza a un nuevo filtro de velas, pero en vez de utilizar tierras diatomeas se utiliza un polímero llamado poli-vinil-poli-pirrolidona (PVPP). La decisión de pasar o no la cerveza por este tipo de filtros, se realiza en la sala de control mediante la apertura o cierre de válvulas y en terreno modificando el orden de líneas en el panel de tuberías.

A continuación, habiendo pasado o no por los filtros PVPP, se le hacen los ajustes de antiespumantes, papaína, caramelo y lúpulo.

Papaína: es la degradación de proteínas de alto peso molecular las que coagulan a temperaturas bajas y precipitan como sustancias turbias, la mayoría de ellas se debe a la formación del complejo proteína-tanino en presencia de oxígeno.

Manuacol: es un alginato de propilenglicol que se prepara especialmente como estabilizador de la espuma de la cerveza.

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

Oblón: son los frutos secos de la planta del lúpulo, sometidos a una extracción con solvente a fin de obtener un extracto rico en ácidos alfa, encargados de dar el amargo a la cerveza, además aporta al perfil aromático de la cerveza y a la estabilidad de la espuma.

Antioxidante: evita o retarda la oxidación de algunos compuestos de la cerveza. El antioxidante utilizado es el Eritorbato de sodio, derivado de la vitamina C.

Stabiquick: es una sílica gel utilizada en cervecería para la estabilización de proteínas, actuando como un adsorbente. Los enlaces proteínas poli fenoles causantes de la turbidez se depositan en la sílica siendo retirados por sedimentación o filtración.

Luego de los ajustes de aditivos, hay un juego de válvulas el cual permite, en caso de filtración de tierras en la cerveza o incidentes parecidos, hacer pasar la cerveza por un nuevo filtro llamado Filtrap, de características similares al primer filtro.

Una vez alcanzado los estándares de sabor y color, se realiza la primera carbonatación de la cerveza en línea en un juego de tuberías en forma de zigzag para asegurar la homogenización de la mezcla. El gas CO₂ se inyecta a 1 bar de presión controlado desde la sala de control.

La cerveza una vez carbonatada, está lista para ser enviada al área de envasado, donde se le hacen ensayos de sabor, color, carbonatación, etc. y de acuerdo a esto, se le añade la cantidad necesaria de CO₂ para que cumpla con la norma y poder ser envasado.

1.4 Objetivo General

Determinar de estado de las variables de la planta con métodos estadísticos y elaborar propuestas para mejorar las variables más influyentes del proceso.

1.5 Objetivos Específicos

- Medir de parámetros de operación y calidad.
- Establecer el estado de las variables del punto de vista estadístico.
- Identificar las variables con errores más recurrentes.
- Proponer soluciones a dichos errores en las variables.

- Analizar la influencia en el proceso de las propuestas.
- Analizar económicamente las propuestas de cambios en el proceso.

2 Marco teórico

En cervecera CCU, con la finalidad de poder ser evaluada de igual forma que el resto de las cerveceras del grupo Heineken, se miden ciertas variables de proceso que apuntan a una mejor calidad y optimización de los procesos cerveceros. Estos parámetros se llaman FTR, por su acrónimo en inglés First Time Right (Hacerlo Bien a la Primera). De acuerdo con estas mediciones se evalúa el ranking de cada cervecera.

2.1 Definiciones de FTR²

Para lograr el objetivo de “Desempeño de Clase Mundial” en cervecería CCU S.A., se ha desarrollado el Principio de Hacerlo Bien a la Primera para el control de procesos y calidad del producto. Este desarrollo se ha realizado mediante el análisis de desglose de TPM (Mantenimiento Productivo Total) de pérdidas aplicadas a las cervecerías, procesos de envasado y calidad de producto.

La importancia de “hacerlo bien a la primera” radica en el elaborar una cerveza de buena calidad, además de evitar el reproceso y optimizar los recursos.

Esta estrategia de implementar el sistema FTR, consiste en la medición de ciertos parámetros en la elaboración de la cerveza que son importantes para la calidad de ésta y la optimización de sus procesos. La gerencia técnica de la empresa, realiza una serie de estándares de estos parámetros según la calidad de la cerveza, los equipos utilizados, el tipo de cerveza o caldo madre que se esté realizando, entre otros. con los parámetros a medir y sus especificaciones y tolerancias, se lleva un conteo de estas mediciones según cumplan o no con la

² Definiciones y Cálculos HeiQ

tolerancia especificada; en caso negativo, se registra el suceso y se anota un punto de no cumplimiento para ese parámetro y para el batch que comprende a esa área. A partir de esta idea se desprenden las siguientes definiciones

2.1.1 Parámetros FTR

Son las mediciones realizadas a los procesos definidas con anterioridad para la elaboración de una cerveza de calidad con un mínimo de reproceso. Estas mediciones pueden ir desde parámetros de operación como concentración de alguna sustancia de interés, cantidad de colonias de ciertas bacterias, entre otros, hasta mediciones de tiempo de proceso, tiempo de llenado, entre otros. Estas mediciones se llevan como porcentaje de mediciones dentro de tolerancia sobre el total de mediciones en un mes.

$$\%FTR = 100 \cdot \frac{\text{Número Total de Mediciones} - \text{número de fallas en el rango de control}}{\text{Número Total de Mediciones}} \quad (2.1)$$

2.1.2 Batch's FTR

Si sistema de medición de parámetros FTR entrega un valor fuera de tolerancia, el batch correspondiente a esa línea de producción, se anotará como “falla”, para luego ser calculado mensualmente de la siguiente forma:

$$\%FTR = 100 \cdot \frac{\text{Número Total de Lotes} - \text{número de Lotes Fallidos}}{\text{Número Total de Lotes}} \quad (2.2)$$

2.1.3 Objetivo FTR

Objetivo FTR	FTR	Alcance
Objetivo por parámetro	≥ 95%	Todos los Parámetros
Objetivo Por Batch	≥ 95%	Todos los Batch's Producidos (Productos/

		Marcas)
--	--	----------------

Este es el objetivo a cumplir para ser una cervecera de clase mundial, por otro lado, existe un sistema de control de estos objetivos por área de elaboración.

2.1.4 Parámetros FTR medidos en CCU

Para 2010, los parámetros FTR en CCU han sufrido ciertos cambios, en algunas áreas se han eliminado algunos y en otras áreas se han agregado otros parámetros. Todo con la finalidad de mejorar la calidad de la elaboración de la cerveza.

La Fig. 2.1 muestra un esquema de las etapas del proceso de cocimiento.

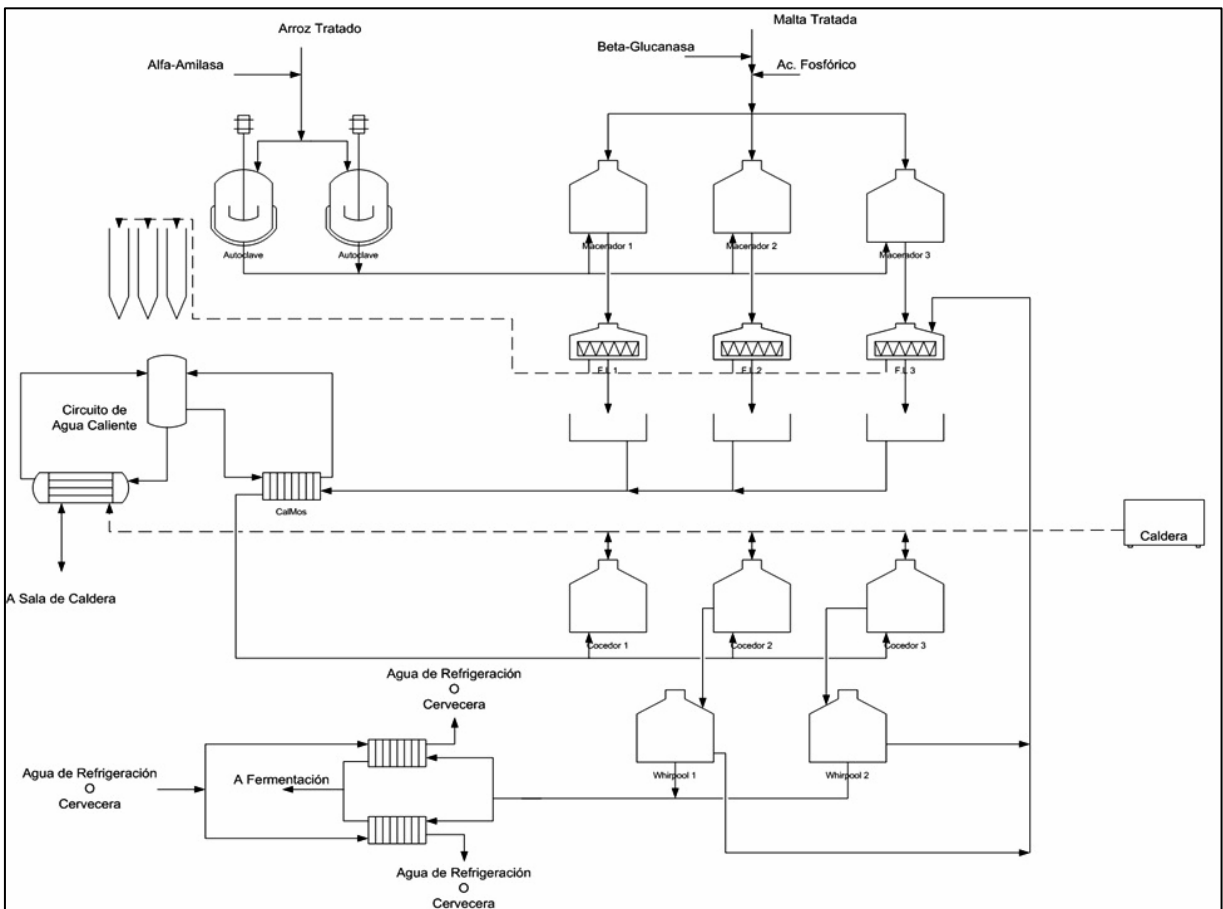


Fig. 2.1 Diagrama de Flujo de Sala de Cocimiento.

La Fig. 2.2 muestra un esquema de las sub-áreas y diagrama de flujo del área de fermentación CCU.

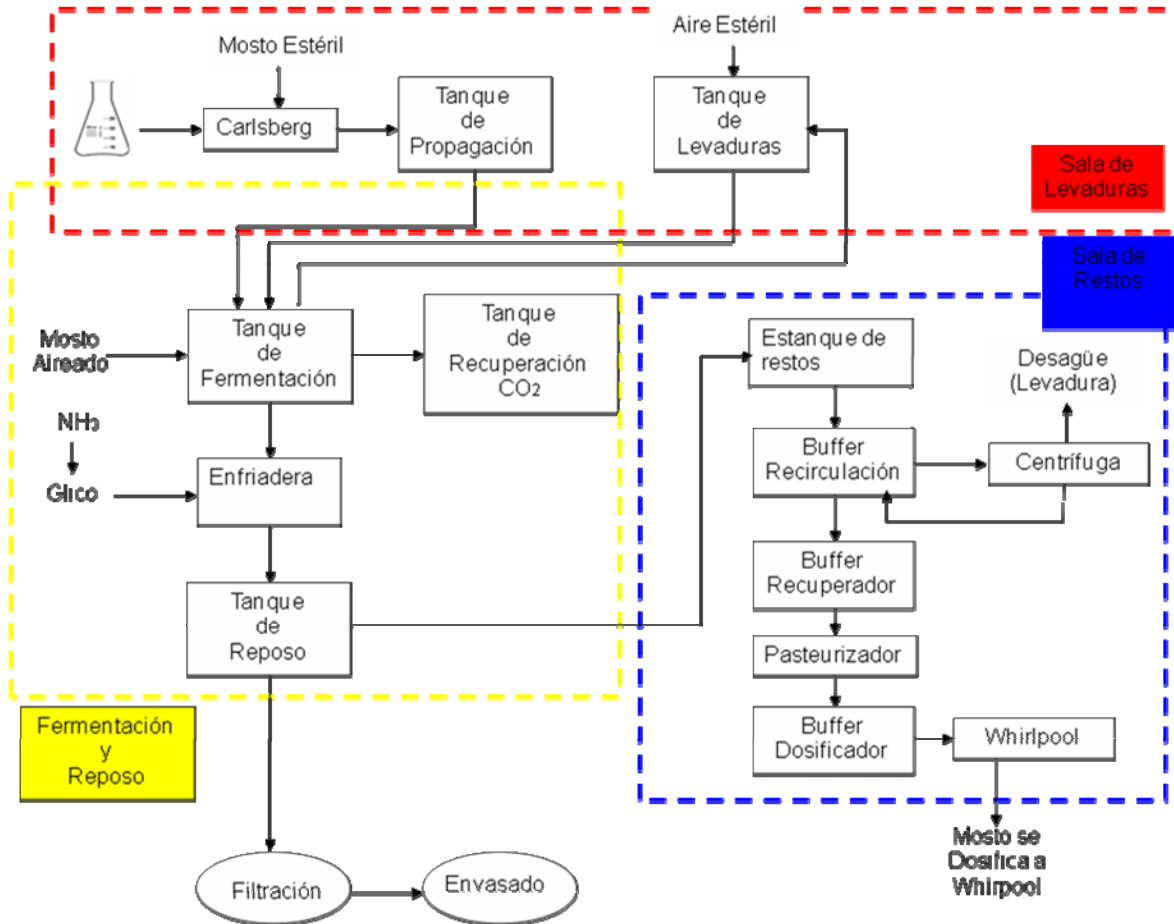


Fig. 2.2 Diagrama de Flujo del Área de Fermentación

La Fig. 2.3 muestra el diagrama de flujo de la fermentación para la cerveza Heineken.

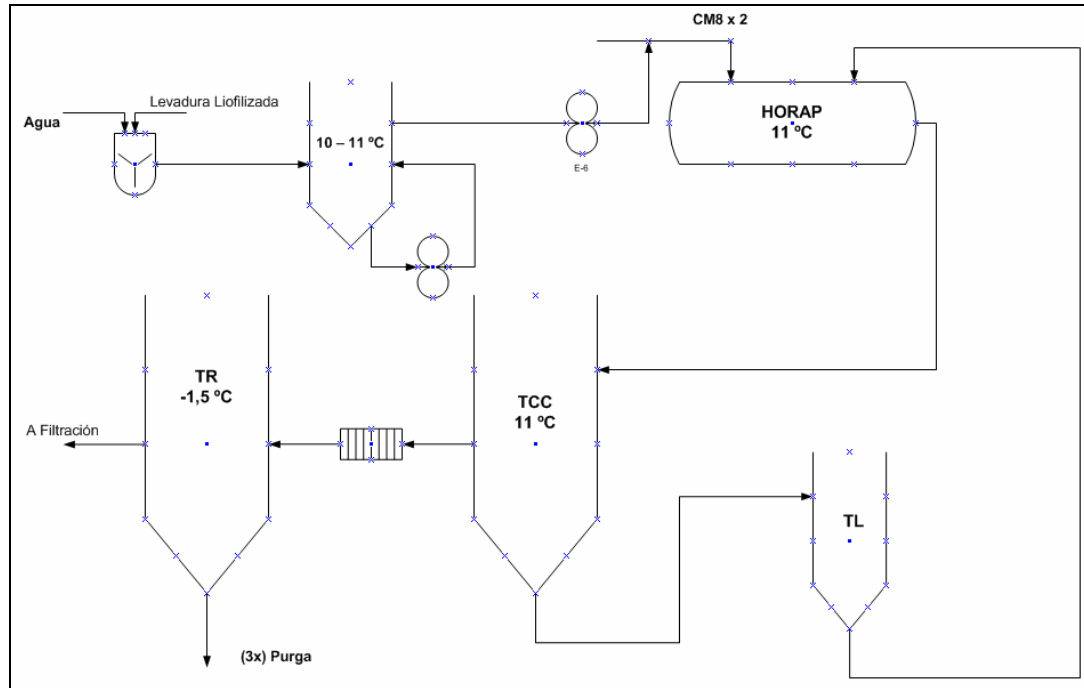


Fig. 2.3 Diagrama de Flujo del Área de Fermentación Heineken

La Fig. 2.4 muestra el diagrama de flujo del proceso de filtrado de la cerveza.

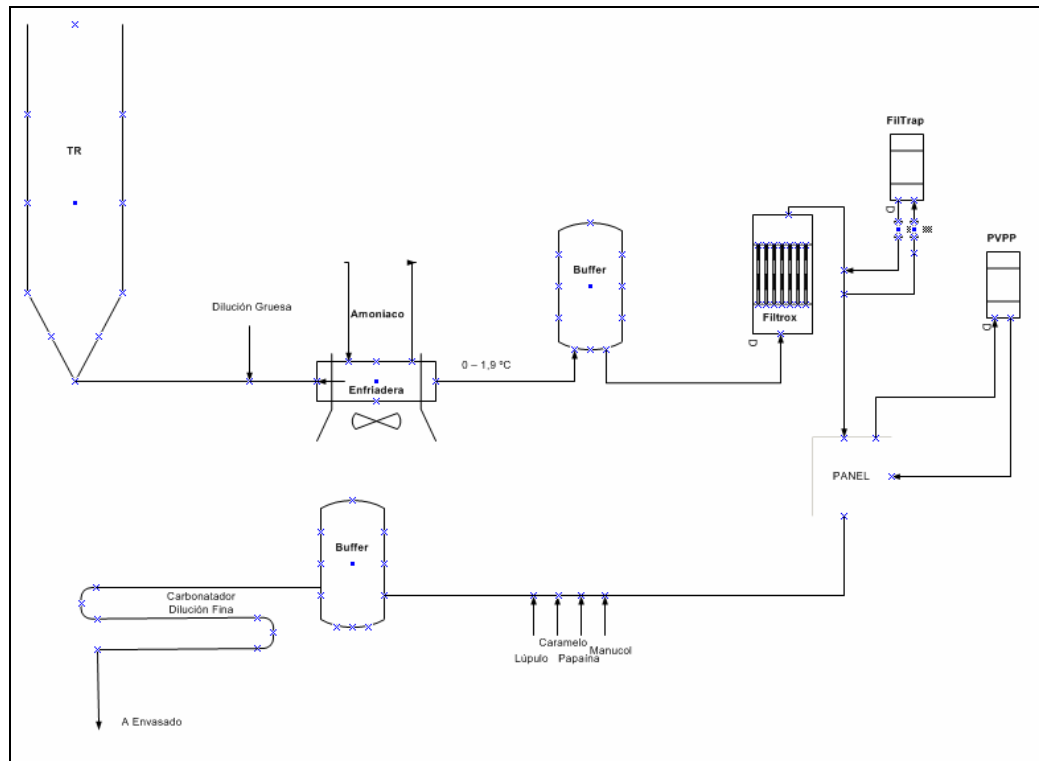


Fig. 2.4 Diagrama de Flujo del Área de Filtros.

2.1.4.1 Cocimiento

En el área de cocimiento, se controlan los parámetros de FTR de tiempo de proceso y °P (grado plato). El tiempo de proceso, es un parámetro que mide el tiempo de utilización de los equipos referente al proceso mismo de la elaboración del caldo madre, aunque no en su totalidad, lo que incluiría limpieza, vaciado, etc. La especificación para dicha medición es de 8 horas 34 minutos a partir del llenado de un autoclave, como se muestra al inicio del diagrama de flujo Fig. 2.1, para todos los tipos de caldo madre a producir; la tolerancia para el tiempo de proceso es de ± 15 minutos.

Grado plato (°P) es la cantidad en gramos de extracto seco primitivo del mosto original de la cerveza contenido en 100 gramos de dicho mosto a 20 °C. El valor de esta unidad debe de transformarse a unidades de peso/volumen mediante la

aplicación de un polinomio (Ec. 2.3). El valor de este parámetro varía dependiendo del CM. que se esté haciendo. La tolerancia es de $\pm 0,3$ °P.

$$\frac{\text{Kg de Extracto}}{\text{Hl de Mosto}} = 1,6682 \cdot 10^{-5} \cdot P^3 + 3,77 \cdot 10^{-3} \cdot P^2 + 0,99894 \cdot P \quad (2.3)$$

2.1.4.2 Fermentación

En esta área de elaboración, además de sus propios parámetros FTR, se incluían también los de FTR de microbiología, siendo estos el conteo de colonias de bacterianas de NBB y UBD, las cuales son bacterias anaerobias y aerobias respectivamente; las cuales a su vez tienen una especificación de 0 y 5 colonias bacterianas por lote medido, sin tolerancia.

La velocidad de fermentación es una variable importante en la formación de la cerveza verde (en estanques UT o TCC, Fig. 2.2), la cual no puede ser muy rápida debido a la formación de productos indeseados en la cerveza y por tratarse de reacciones que involucren levaduras. Los valores de este parámetro varían para pintas CCU y Heineken, [2,2 – 2,8] y [1,5 – 1,9] [°P/Día] respectivamente

El parámetro de células muertas se mide en los estanques de levadura (TL) que ha sido cosechada de fermentaciones anteriores, esta medición se realiza en forma de porcentaje y afecta directamente a la velocidad de fermentación. Este parámetro no debería exceder el 3 % de células muertas. Para el cumplimiento de esta especificación, se cuenta con un sistema de dosificación de levadura llamado Aber, el cual diferencia las células vivas de las muertas y puede hacer una evaluación de la consistencia de ésta. De esta forma asegura una buena calidad de levadura dosificada.

Por otra parte, está el tiempo de llenado. Este parámetro sirve para ver el uso efectivo del equipo en el tiempo. Dicha medición la realiza el operador de turno, en línea, viendo el tiempo transcurrido durante el llenado del estanque. Para la producción de cerveza Heineken, el rango de tiempo de llenado es de 12 a 24 horas

de separación entre los dos cocimientos que se adicionan al estanque tipo HORAP (Fig. 2.3). Para las pintas CCU, este rango de tiempo varía según el estanque en que se realice la fermentación (UT o TCC), ya que las capacidades de cada uno de los estanques es diferente (6500 y 3200 HI, respectivamente. -650 m³, 320 m³-).

El tiempo de residencia de levadura es el tiempo que transcurre desde que se cosecha hasta que se siembra (inocula) la levadura. Éste debe ser menor a 3 días.

Momento de cosecha es el tiempo que transcurre desde que se siembra la levadura hasta su cosecha. Este tiempo se debe mantener según la especificación: 24 horas ± 2 horas, desde el momento en que finaliza la fermentación. Esta medición es vital para evitar la autólisis de la levadura, lo que afecta la turbidez, pH de la cerveza, la espuma y el sabor de la cerveza.

2.1.4.3 Filtros

En esta área, se controlan los parámetros de extracto original, turbidez, color, CO₂ y O₂. Estas variables deben funcionar, idealmente, bajo especificación, ya que son los que determinan la calidad de la cerveza bajo las condiciones de almacenamiento a largo plazo.

El parámetro de turbidez es el que arroja más errores en planta. Es por esto que se ha creado una comisión la cual se compone de un jefe de cada área, una persona de laboratorio, una persona de OCA³ y una de gerencia técnica. La finalidad de esta comisión es realizar un análisis profundo a los lotes que han salido defectuosos en turbidez y su respectivo seguimiento para encontrar la causa principal de esta falla repetitiva. La turbidez puede ser afectada por células que no floculan y quedan en suspensión, pajilla proveniente de la malta, cadenas proteicas que no hayan sido decantadas en el Whirlpool en cocimiento, bajo tiempo de reposo el cual no permite que floculen las células que aun puedan quedar en la cerveza, etc.

³ Optimización de la Cadena de Abastecimiento.

Respecto del control de esta variable se puede mencionar que el extracto original depende del tipo de cerveza que se esté filtrando, ya que es el parámetro que determina el cuerpo de ésta. La turbidez debe ser menor a 0,8 ° EBC, esto le permite a la cerveza ser almacenada por más tiempo sin descomponerse. El CO₂ es común para todas los tipos de cerveza y el rango de especificación es de 2,6 – 2,8 % v/v. El O₂ es importante que se encuentre en la menor cantidad posible en la cerveza final, ya que ésta se oxida en presencia de oxígeno. El color es un parámetro que depende de la cerveza que se esté produciendo. Todos estos parámetros FTR se miden en un estanque DT lleno antes de su envío a envasado.

Los parámetros son registrados y subidos a un sitio en donde se evalúa a la empresa según su cumplimiento de dichas variables, en donde el resto de las cerveceras registran su cumplimiento en base a los mismos parámetros.⁴

2.1.5 Control estadístico de proceso

El Control Estadístico de Procesos (Statistical Process Control, SPC) constituye una metodología de diagnóstico de la “estabilidad” de un indicador de calidad de un proceso y de su capacidad para cumplir con sus especificaciones o límites de tolerancia. Adicionalmente, y no menos importante, apoya las decisiones de gestión al permitir entender en profundidad el concepto de variación y sus tipos.⁵

El control estadístico de procesos aplicado al área de elaboración de la cerveza en CCU S.A., tiene como finalidad determinar el estado de la planta desde el punto de vista estadístico para ver la posibilidad de implementar un sistema de calidad y estrategia seis sigma. El sistema de calidad seis sigma es una metodología de producción de bienes y/o servicios que se basa en la satisfacción de las necesidades de los clientes mediante la medición de datos y hechos. Con la finalidad

⁴ Manual del Sistema de FTR.

⁵ Osvaldo Ferreiro P., Ph D., Apunte: Control Estadístico de Procesos (Y Estrategia Seis Sigma)

de apuntar a la perfección. La producción bajo una estrategia seis sigma se traduce en un tener 3,4 DPMO (defectos por millón de oportunidades)⁶.

2.1.6 Gráficos de control

Los gráficos de control son una de las herramientas estadísticas más utilizadas en el control estadístico de procesos, ya que entregan de manera clara el comportamiento de la variable de proceso en estudio, pudiendo de esta forma, determinar si el proceso está bajo control.

2.1.7 Límites naturales del proceso

Para el seguimiento de los parámetros FTR se cuenta con límites de control, los cuales apuntan a trabajar bajo especificación, sin embargo en algunos casos, por el comportamiento inherente del proceso estos se trabajan bajo tolerancia. Dichos límites de control son determinados por motivos de calidad de la cerveza y de operación. Por otra parte existen límites naturales de procesos que se determinan de forma estadística, los cuales dependen de su desviación de la media según el siguiente método.

$$LSNP = \mu + \mu_r \cdot 2,66 \quad (2.4)$$

$$LINP = \mu - \mu_r \cdot 2,66 \quad (2.5)^7$$

Donde,

LSNP: Límite superior natural del proceso.

LINP: Límite inferior natural del proceso.

⁶ Miguel Ángel García Madurga, Seis Sigma Básico.

⁷ 2,66, cifra obtenida de tablas estadísticas regidas por la ecuación: $A_2 = 3/D_2\sqrt{n}$. Que para cantidad de datos infinitos $A_2 = 2,66$, de igual forma que para la constante 3,267 sobre el Límite Superior de los Rangos.

M: Media del proceso.

M_R : Media de los rangos de las mediciones.

2.1.8 Metodología de prueba de procesos bajo control

Graficando estos valores junto con los datos de las muestras, se obtiene un grafico con sus límites naturales.

Además, se debe realizar una lista de los rangos entre mediciones sucesivas, así como también su media, según el siguiente ejemplo:

Lote	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Medida	23	26	24	20	28	25	24	25	27	26
Rango		3	2	4	8	3	1	1	2	1

Tabla 2.1: Tabla ejemplo de lotes con sus respectivas medidas y diferencia de rangos

De esta forma se construye el grafico de los rangos de datos, el cual a su vez tiene solo límite superior calculado de la siguiente forma:

$$LSR = \mu_r \cdot 3,267 \quad (2.6)$$

Donde,

LSR: Límite superior de los rangos.

Obteniéndose así las Fig 2.5 y 2.6, respectivamente:



Fig. 2.5: Gráfico ejemplo de serie de datos aplicado a la metodología seis sigma.



Fig. 2.6: Gráfico ejemplo de serie de rangos de mediciones de datos, aplicado a la metodología seis sigma.

Una vez construidos los gráficos, se verifica una serie de “señales de inestabilidad” las cuales nos ayudan a determinar si nuestro proceso está bajo control o no. Estas señales son las siguientes:

- 1 de los puntos en cualquiera de los rangos está fuera de las líneas rojas.
- 2 de 3 puntos consecutivos están fuera de las líneas naranjas.

- 4 de 5 puntos consecutivos están al mismo lado de la media y fuera de las líneas amarillas.
- 7 puntos consecutivos están al mismo lado de la media.

De esta forma, se obtiene que si estas fueran mediciones de un proceso, éste estaría bajo control.

Sin embargo, existen procesos que no cumplen con estas reglas para lo cual habría que realizar un estudio para ver qué tipo de causas son las que provocan dichos errores. Para esto, el método entrega una clasificación de las causales de estas fallas: causas comunes y causas especiales.

Las causas especiales se deben a motivos asignables que se pueden identificar. No son aleatorias y cambian con el tiempo. Usualmente son causadas por una fuerza que actúa sobre el proceso desde el exterior. Esta variación puede ser eliminada al eliminar la fuerza exterior que actúa sobre el proceso.

Las causas comunes son aquellas de naturaleza aleatoria, estable y consistente en el tiempo. Es una parte inherente del proceso en sí misma y solo puede ser cambiada cambiando el proceso. Ya que la gerencia es la dueña y crea el proceso, depende de ella cambiar el proceso para minimizar la variación.⁸

De acuerdo a Deming⁹, 85% a 95% de toda la variación es de causa común; 5% a 15% de toda la variación es de causa especial.

2.1.9 Seis sigma y metodologías relacionadas

La metodología seis sigma está relacionada con la mejora continua de procesos productivos y prestación de servicios, la cual tiene como finalidad

⁸ Miguel Ángel García Madurga, Seis Sigma Básico.

⁹ William Edwards Deming (14 de octubre de 1900 - 20 de diciembre de 1993). Estadístico estadounidense, profesor universitario

mejorarlos al punto de poder obtener un máximo de 3,4 defectos por millón de oportunidades (DPMO)¹⁰.

El nombre de la metodología proviene de la estadística, la cual describe una distribución normal con la mayor cantidad de los datos alrededor de la media, es decir, se enfoca en obtener un 99,9997% de efectividad. En el ámbito de las empresas que trabajan bajo esta metodología, miden su desempeño en cantidad de sigmas.

σ	Nivel de Calidad	DPMO
2	69,2%	308.537
3	93,3%	66.807
4	94,4%	6.210
5	99,97%	233
6	99,9996%	3,4

Tabla 2.2: Nivel de calidad obtenido según nivel de sigma alcanzado.

El número de sigmas es lo que en estadística se conoce como Z, valor que se calcula de la siguiente forma:

$$Z = \frac{LSE - LIE}{\sigma} \quad (2.7)$$

Donde,

¹⁰ Defectos Por Millón de Oportunidades (DPMO) para un sistema no centrado, respecto de una distribución normal.

Z: Valor *estadístico* de la curva normal de frecuencias.

LSE: Límite superior de especificación.

LIE: Límite inferior de especificación.

Una vez que el indicador de calidad en estudio está bajo control, es necesario saber la capacidad del proceso o de la variable medida. Esto se logra calculando el índice de capacidad potencial de proceso (ecuación para proceso centrado):

$$C_p = \frac{LSE - LIE}{6 \cdot \sigma} \quad (2.8)$$

Donde,

C_p: Capacidad Potencial del Proceso

LSE: Límite Superior de Especificación.

LIE: Límite Inferior de Especificación.

σ: Desviación Estándar.

Esta ecuación nos dice cuan capaz es el proceso respecto de su desviación estándar. En una desviación cercana a la normal, el rango práctico de las observaciones está dentro del rango de 6 σ. En consecuencia, el índice de capacidad potencial (C_p) se compara el rango permitido por las especificaciones con el rango práctico alcanzado.

$$C_p \geq 1 \quad 2.9$$

En el caso de que la variable no esté centrada (Fig. 2.7) la ecuación 2.9 cambia al índice de capacidad efectiva (Ec. 2.10).

$$Cpk = \text{Min} \left\{ \frac{LSE - \mu}{3\sigma}, \frac{\mu - LIE}{3\sigma} \right\} \quad 2.10$$

Una vez que se ha alcanzado el objetivo de tener el proceso bajo control y el nivel de calidad seis sigma, esta capacidad del proceso debe ser mayor a 2 para un proceso centrado y mayor a 1,5 para el caso de descentramiento.

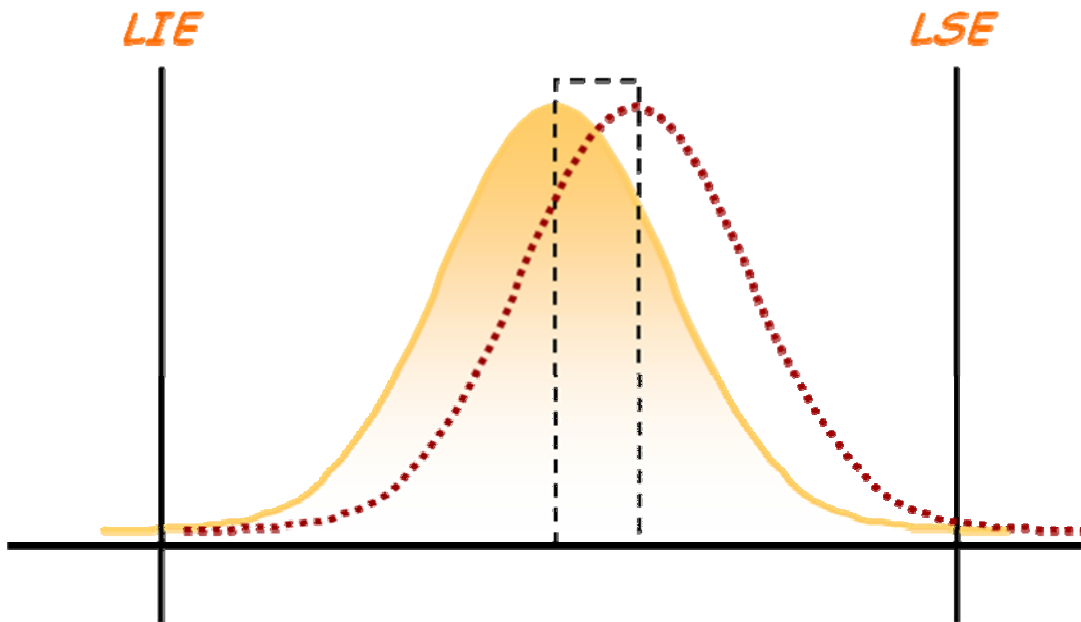


Fig. 2.7 Distribución normal de un sistema no centrado (línea punteada) y sistema centrado (línea continua).

En conjunto con el control estadístico de procesos enfocado a seis sigma, se complementa con otras herramientas estadísticas, tales como la utilización del diagrama de Pareto¹¹ y el de Ishikawa¹².

¹¹ El principio de Pareto es también conocido como la regla del 80-20 y recibe este nombre en honor a Vilfredo Pareto, quien lo enunció por primera vez.

El diagrama de Ishikawa, es una herramienta administrativa que tiene por finalidad entregar la causa raíz del problema, mediante un análisis de este con el personal encargado del área en cuestión.

Para comenzar, se fija el problema a estudiar anotándolo al costado derecho de una hoja en blanco, en el mismo sentido que una línea central. Posteriormente se escriben categorías apropiadas a la problemática, para luego realizar una “lluvia de ideas” (brainstorming) de las posibles causas y relacionarlas con cada categoría antes anotada, preguntando por qué a cada causa no más de tres veces (Fig. 2.8).

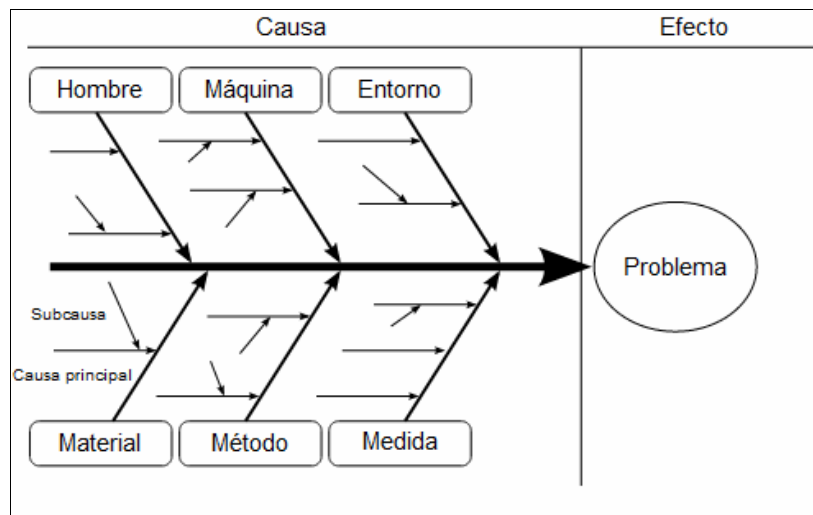


Fig. 2.8: Diagrama de Ishikawa o causa-efecto.

De esta forma, se puede obtener la raíz de la problemática en algún proceso, manufactura, prestación de algún servicio, etc.

El Diagrama de Pareto o *Curva 80-20*, es una gráfica que se utiliza para establecer un orden de prioridades de los problemas o causas que afectan la problemática en algún proceso. Consiste en ordenar las causas de mayor a menor respecto de la cantidad de errores en forma de porcentaje que arrojen cada una

¹² El Diagrama de Ishikawa, también llamado diagrama de causa-efecto, concebido por el ingeniero japonés Dr. Kaoru Ishikawa en el año 1943.

sobre el total de fallas registradas, para luego construir un gráfico de barras. Luego se calcula el porcentaje acumulado en el mismo orden y se construye un gráfico de línea en la misma área en que se hizo el gráfico de barras, como se muestra en la Fig. 2.9.

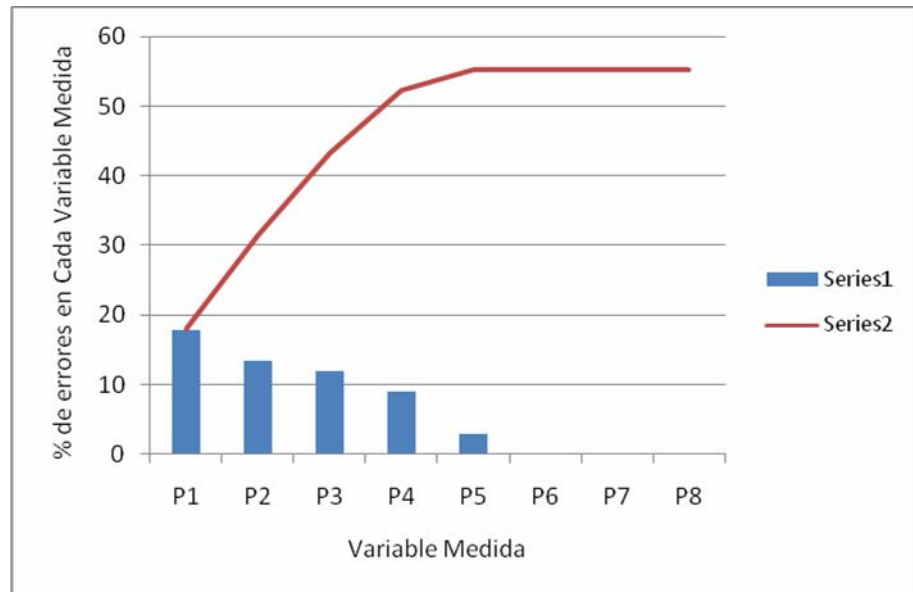


Fig. 2.9: Ejemplo Diagrama de Pareto.

Una vez construido el gráfico, se procede a identificar el punto de inflexión de la línea que indica el porcentaje acumulado de fallas o errores, el cual indicaría a su vez, las variables que se deberían considerar como prioridad.

De esta forma, uno se puede enfocar en los problemas que realmente necesitan atención dejando de lado o para su posterior solución los que no requieren tanta atención.

3 Plan de trabajo

El plan de trabajo se basó en cinco etapas principales: Recolección datos, lo que comprendió el registro de las mediciones realizadas a los parámetros FTR; luego se realizó el estudio estadístico de dichos parámetros, que tiene como objetivo establecer el estado de la planta, es decir, si está bajo control estadístico o no; posteriormente, con los datos obtenidos y luego de haber separado las variables que más afectan el resultado final del FTR global del área de elaboración, se procedió a realizar las propuestas para las mejoras de dichos parámetros; finalmente se realizó el análisis técnico y económico de las propuestas.

3.1 Medición de parámetros FTR

Debido a que la finalidad del proyecto es identificar los parámetros más problemáticos, este comienza con la medición y registro de todas las variables de la elaboración de la cerveza que han sido mencionadas anteriormente.

3.1.1 Medición de parámetros en área de cocimiento

3.1.1.1 Grado Plato

La medición de este parámetro se realiza en la mitad del enfriamiento del mosto por alguno de los encargados de proceso que mediante un toma muestra (Fig. 3.1) ubicado a continuación del intercambiador de placas, para luego ser medido con un instrumento que entrega la concentración de azúcar en grado plato (°P). Según esto, se pidió que enviaran la planilla del FTR de cocimiento cada vez que fuera emitido.



Fig. 3.1 Toma muestra de mosto frio.

3.1.1.2 Tiempo de Proceso

El tiempo de proceso, se cuenta a partir de la recepción del arroz a alguno de los maceradores y cuenta sólo las etapas de proceso en que se está produciendo el mosto, es decir, no se cuenta el momento en que se les hace aseo a los equipos o en el vaciado de estos. Para esto se tiene como referencia una planilla (Fig. 3.2) en donde ingresan la fecha y la hora en que se recibe el adjunto y se llena automáticamente la hora a la que se debería estar haciendo la tarea siguiente. Para analizar este parámetro, se analizó por 5 días el tiempo que demoraba cada paso del proceso, verificando cada punto anotado en la actual planilla de registro, verificando así los desfases de tiempos reales versus planilla.

	Rec Adjunto	Calentar a 75° C	Reposo a 75° C	Calentar a 90°C	Reposo a 90°C	Subir Tempe	103°C+Pres	recibir autoclave	reposo 64°C	calentar	reposo 72°C
	0:15	0:10	0:15	0:10	0:15	0:10	0:15	0:06	0:56	0:10	0:15
N° Cocimiento	Rec Adjunto	Calentar a 75° C	Reposo a 75° C	Calentar a 90°C	Reposo a 90°C	Subir Tempe	103°C+Pres	recibir autoclave	reposo 64°C	calentar	reposo 72°C
4013	27-11-2009 5:20	5:35	5:45	6:00	6:10	6:25	6:35	6:50	6:56	7:52	8:02
4014	27-11-2009 6:21	6:36	6:46	7:01	7:11	7:26	7:36	7:51	7:57	8:53	9:03
4015	27-11-2009 7:18	7:33	7:43	7:58	8:08	8:23	8:33	8:48	8:54	9:50	10:00
4016	27-11-2009 8:26	8:41	8:51	9:06	9:16	9:31	9:41	9:56	10:02	10:58	11:08
4017	27-11-2009 9:23	9:38	9:48	10:03	10:13	10:28	10:38	10:53	10:59	11:55	12:05
4018	27-11-2009 10:29	10:44	10:54	11:09	11:19	11:34	11:44	11:59	12:05	13:01	13:11
4019	27-11-2009 11:29	11:44	11:54	12:09	12:19	12:34	12:44	12:59	13:05	14:01	14:11
4020	27-11-2009 12:36	12:51	13:01	13:16	13:26	13:41	13:51	14:06	14:12	15:08	15:18
4021	27-11-2009 13:29	13:44	13:54	14:09	14:19	14:34	14:44	14:59	15:05	16:01	16:11
4022	27-11-2009 14:29	14:44	14:54	15:09	15:19	15:34	15:44	15:59	16:05	17:01	17:11
4023	27-11-2009 15:44	15:59	16:09	16:24	16:34	16:49	16:59	17:14	17:20	18:16	18:26
4024	27-11-2009 16:50	17:05	17:15	17:30	17:40	17:55	18:05	18:20	18:26	19:22	19:32
4025	27-11-2009 18:00	18:15	18:25	18:40	18:50	19:05	19:15	19:30	19:36	20:32	20:42
4026	27-11-2009 19:04	19:19	19:29	19:44	19:54	20:09	20:19	20:34	20:40	21:36	21:46

Fig. 3.2 Parte de la planilla de Tiempo de Proceso FTR - SDC

3.1.2 Medición de parámetros en área de fermentación

Debido a que en esta área el FTR requiere de cálculos para su anotación, por un mes se llevó el FTR (Fig. 3.3) de dicha área en paralelo con el jefe de área. De esta forma se pudo observar de mejor forma cuales eran los parámetros que más fallan y por qué.

MAYO									
filling time ferm	yeast dosage	fermentacion Speed	Dead cells	Yeast resident time	Ferm storageharvest moment	batch			
Tiempo de llenado, hrs	dosificación de levaduras	Veloc. Ferme. °P/día	Células Muertas (en %)	Guarda de levadura (días)	Momento de la cosecha(días)	BATCH	Clado madre	fecha de llenado	UT/TCC
depende el estamque	siempre en 100%	2,2 a 2,8 °p por dia	menor al 3 %		24 mas menos 2			descripcion	estanque
ok	ok	OK	OK	ok	OK	ok	4	20-4-10 6:30 AM	65
ok	ok	OK	sin medicion	ok	OK	ok	4	20-4-10 9:45 AM	54
ok	ok	OK	sin medicion	ok	OK	ok	4	20-4-10 1:00 PM	22
ok	ok	OK	sin medicion	ok	OK	ok	4	20-4-10 9:06 PM	124
ok	ok	OK	sin medicion	ok	OK	ok	4	21-4-10 8:00 AM	101
ok	ok	OK	sin medicion	ok	OK	ok	4	21-4-10 4:00 PM	103
ok	ok	OK	sin medicion	ok	OK	ok	4	21-4-10 9:54 PM	27
ok	ok	falla	sin medicion	ok	OK	falla	4	22-4-10 5:20 AM	114
ok	ok	OK	sin medicion	ok	OK	ok	4	22-4-10 10:05 AM	21
ok	ok	OK	sin medicion	ok	OK	ok	4	22-4-10 1:55 PM	16
ok	ok	OK	sin medicion	ok	OK	ok	4	22-4-10 3:45 PM	17
ok	ok	OK	sin medicion	falla	OK	falla	7	22-4-10 7:42 PM	51
ok	ok	OK	sin medicion	ok	OK	ok	7	22-4-10 11:15 PM	61
ok	ok	OK	sin medicion	ok	OK	ok	7	23-4-10 2:05 AM	63
ok	ok	OK	sin medicion	ok	OK	ok	4	23-4-10 9:36 AM	105
ok	ok	OK	sin medicion	ok	OK	ok	4	23-4-10 2:10 PM	52

Fig. 3.3 Planilla FTR de Fermentación

Una vez definida la variable dependiente a controlar (Temperatura) y encontradas las variables que más afectan a dicho parámetro, mediante un análisis de sensibilidad, se midió la temperatura real de los estanques TCC que tenían problemas y se comparó con la temperatura que entrega el sistema de control para luego entregar las conclusiones respectivas.

3.1.3 Medición de parámetros en área de filtros

Debido a que esta área es el último paso en la elaboración de la cerveza, no existe mayor problemática con los parámetros FTR a excepción de la turbidez.

De esta área, solo se recopiló la información a través de lo que lleva el encargado de procesos en su planilla FTR, sin embargo esta persona lleva dicha planilla solo de la forma “aprueba – no aprueba”, por lo que se tuvo que obtener la información del sistema de división industrial que tienen en línea con todos los datos de proceso, obteniéndose de esta forma los datos para establecer los parámetros FTR.

4 Análisis de resultados

La primera parte de este estudio es netamente estadística, lo cual tiene como finalidad establecer el estado de control de la planta. Para esto se construyeron gráficos de control de todas las variables con sus límites naturales de control, cada uno con su respectivo nivel de sigma.

4.1 Construcción de gráficos de control

Siguiendo la metodología mencionada en la sección 2.1 se construyeron los gráficos de control de cada una de las variables FTR de cada una de las 3 áreas del proceso.

4.1.1 Cocimiento:

4.1.1.1 Tiempo de Proceso

Según la metodología propuesta por “6 Sigma” esta variable se encuentra fuera de control debido a los puntos que sobrepasan las líneas rojas (Fig. 4.1).

Por otra parte, tiene una media de 8 horas 48 minutos, lo que se escapa de la especificación requerida para este parámetro (8 horas 34 minutos). Además, según la ecuación 2.7, este parámetro cuenta con un nivel de sigma de 1,48.

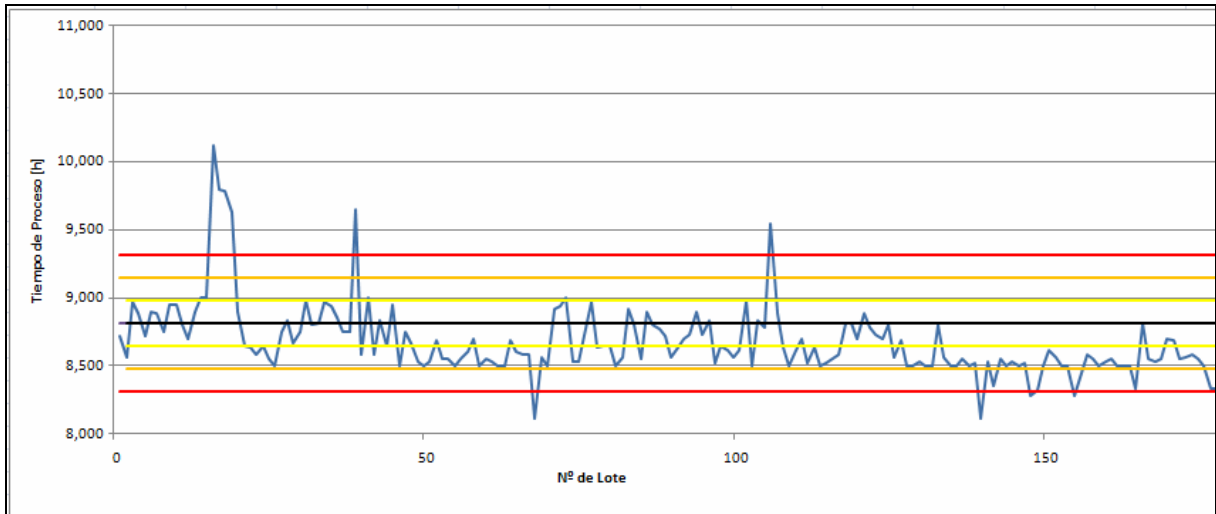


Fig. 4.1 Gráfico de tiempo de proceso – Control estadístico.

4.1.1.2 Grado Plato (°P)

Según la Fig. 4.2 también estaría fuera de control según la metodología propuesta, sin embargo para este caso existe una excepción, ya que por el sistema de planificación del área se elaboran CM 8 pero con el nombre de CM 4, es por esto que se deben eliminar estos puntos y re elaborar los gráficos provocando el cambio de los límites, desviación estándar y el nivel de sigmas.

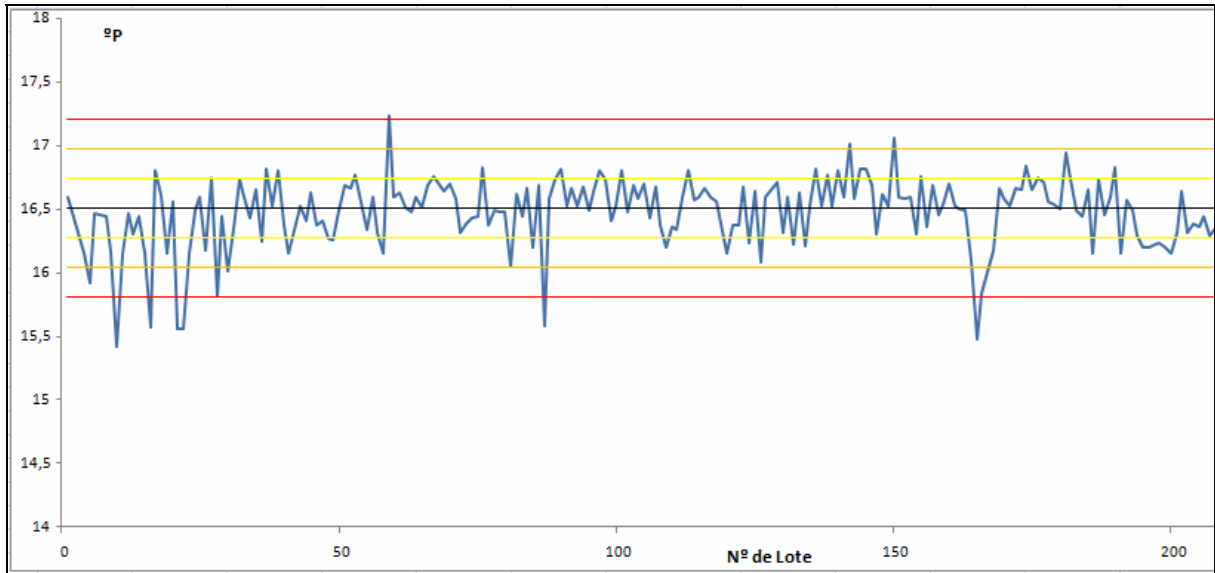


Fig. 4.2 Gráfico de Extracto en Mosto Frio- Control estadístico.

Aún sin eliminar los puntos que no corresponden a CM 4, el promedio de este grupo (Fig. 4.2) de muestras es el de la especificación del parámetro (16,51 °P), sin embargo tiene un nivel de sigma de 1,9 lo que apunta a mejorar la variabilidad del proceso, lo cual es visible en el gráfico de rango de mediciones del parámetro (Fig. 4.3).

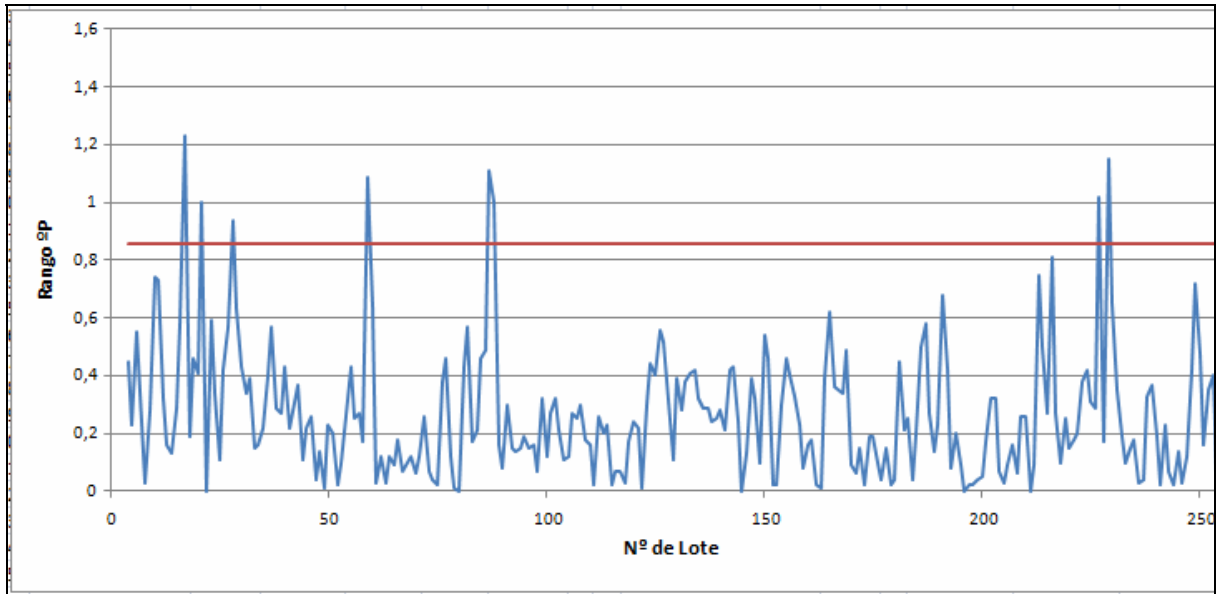


Fig. 4.3 Gráfico de Rango de Extracto en Mosto Frio. Control Estadístico.

Del gráfico se puede apreciar la variabilidad del extracto en el mosto frío, la cual tiene una desviación estándar de 0,25 y un promedio de 0,26, lo que demuestra un bajo control de la variable, además de estos sobrepasar la línea roja de control natural del proceso.

4.1.2 Fermentación

4.1.2.1 Velocidad de Fermentación

En este caso no se ve una variación apreciable del parámetro de velocidad de fermentación (Fig. 4.4) del FTR de Mayo, sin embargo por el historial de años anteriores parece ser la variable que arroja más errores en el área. Aún así aparece como una variable fuera de control por los puntos que sobrepasan la línea roja. Además tiene un promedio de 2,49 y una desviación estándar de 0,24 lo cual define una variación menor, ya que la especificación de este parámetro es de 2,5 con lo que quedaría aun dentro de los límites de tolerancia.

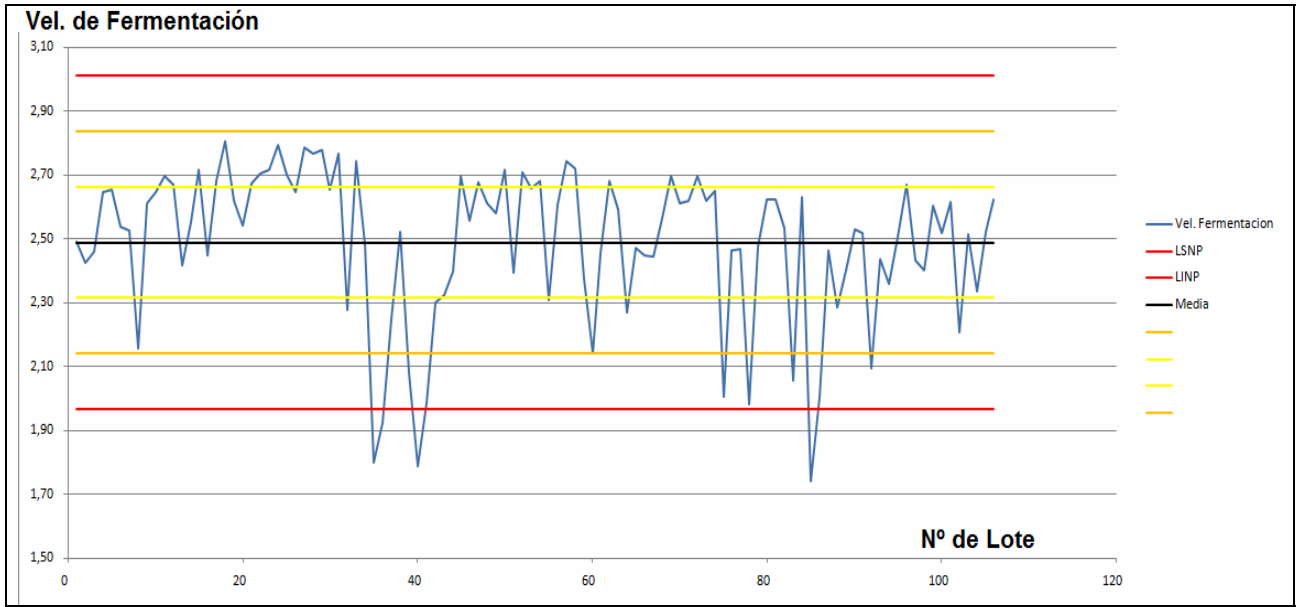


Fig. 4.4 Gráfico de Velocidad de Fermentación [°P/Día] – Control estadístico.

Por otra parte también está el gráfico de rango de la variable (Fig. 4.5), el cual muestra una variabilidad más estable, sin embargo tampoco está bajo control debido a que también sobrepasa la línea roja.

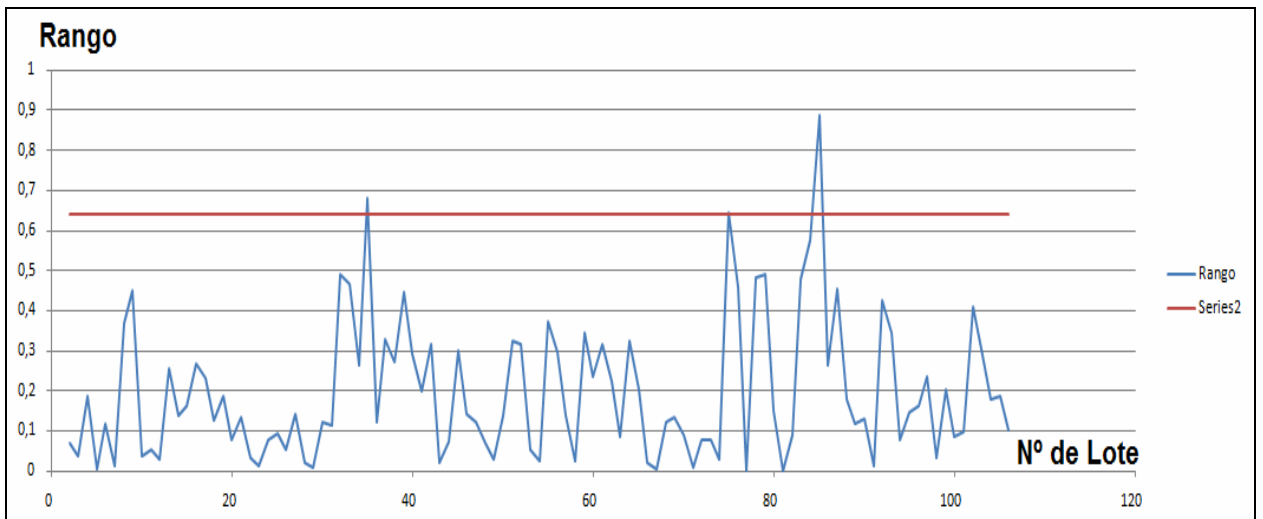


Fig. 4.5 Gráfico de Rango de Velocidad de Fermentación – Control Estadístico.

4.1.2.2 Momento de Cosecha

Con un promedio de 1,052 días (25,2 horas) y una desviación estándar de 0,04 (0,93), el momento de cosecha (Fig. 4.6) aparece como una variable fuera de control, sin embargo los puntos que sobresalen por encima de la línea roja sin saber su causa, podrían considerarse causas especiales de error, por lo que quedaría bajo control estadístico. Además, ninguna de las otras condiciones nombradas en la sección 2.1.7 se cumple.

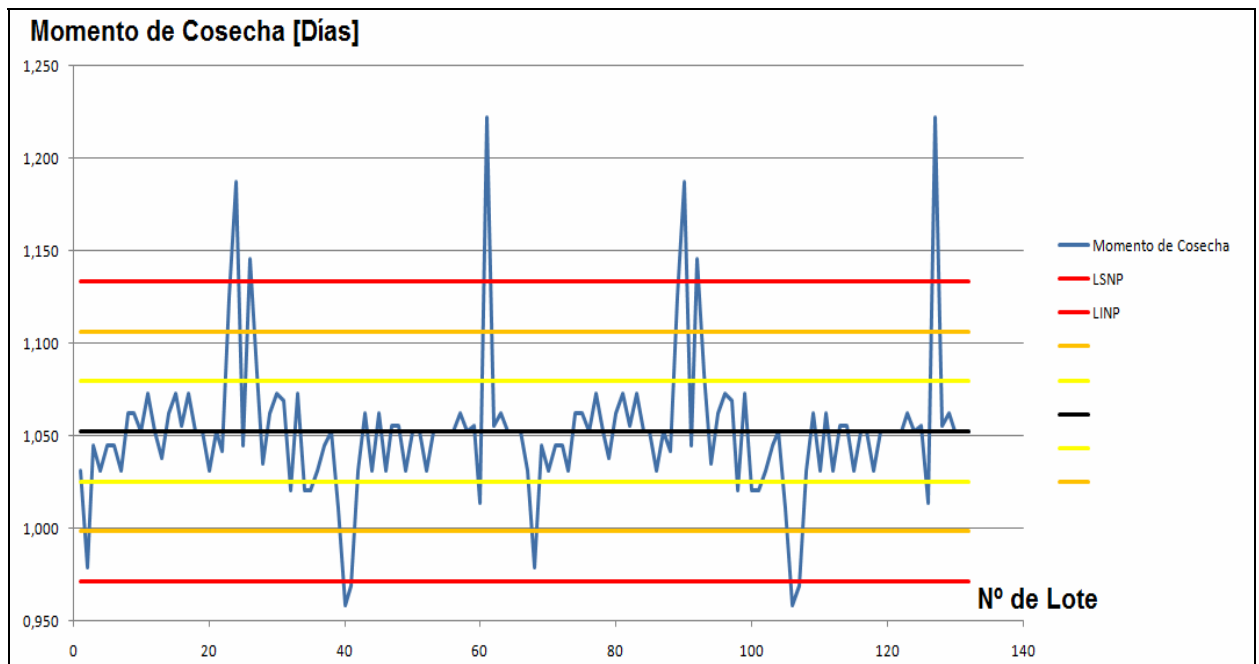


Fig. 4.6 Gráfico de Momento de Cosecha. – Control Estadístico.

Con esto podría considerarse una variable bajo control estadístico, lo cual demuestra el gráfico de la Fig. 4.7, ya que los sobrepasos de la línea roja coinciden con los del gráfico anterior y sin ellos estaría bajo control estadístico y con una variabilidad baja.

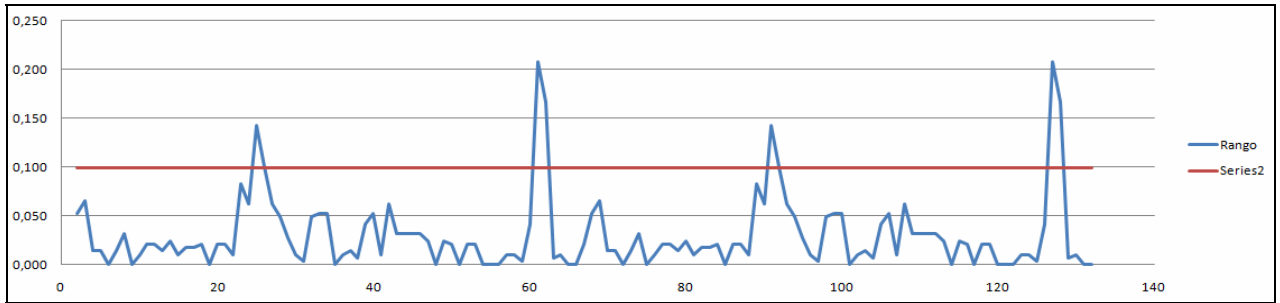


Fig. 4.7 Gráfico de Rango de Momento de Cosecha. – Control Estadístico.

4.1.2.3 Guarda de Levadura

Este parámetro tiene una variabilidad más que considerable, como se aprecia en la Fig. 4.8, sin embargo los puntos máximos son del orden de 6 días, mientras que la especificación de este es de 5 días, por lo que no tiene gran influencia en su control.

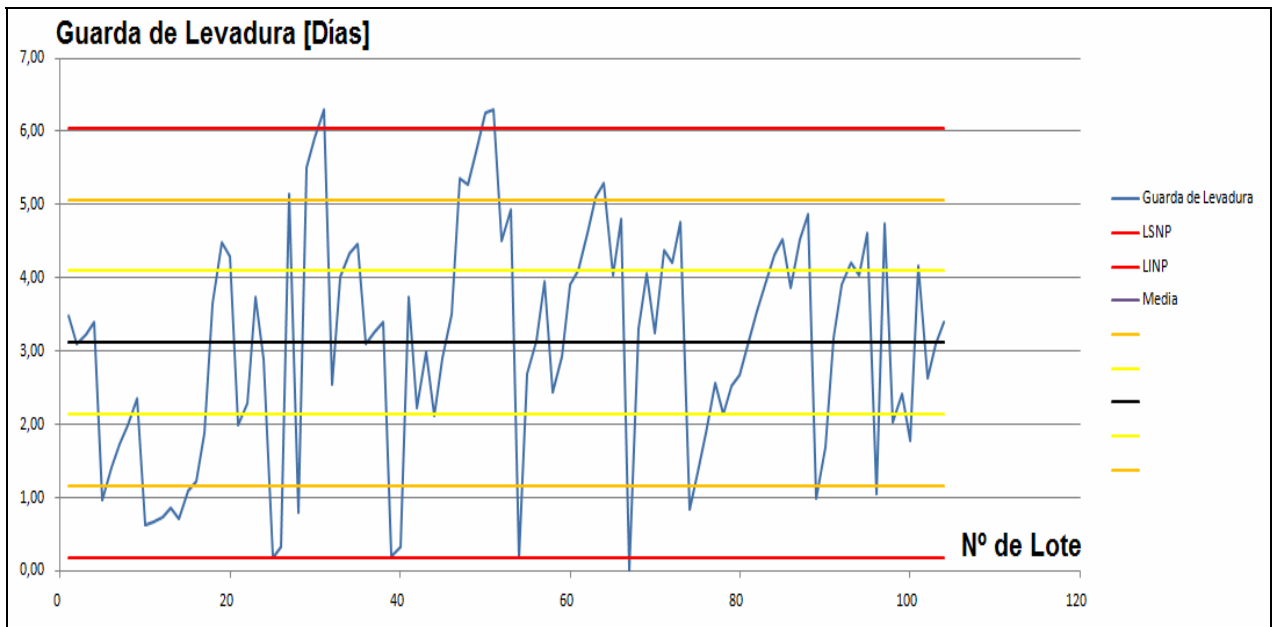


Fig. 4.8 Gráfico de Guarda de Levadura. – Control estadístico.

Su media y desviación estándar son 3,12 días y 1,74 respectivamente.

4.1.2.4 Tiempo de Llenado

El tiempo de llenado tiene mucha variabilidad, sin embargo no se hace la diferencia según el tipo de equipo que se esté llenando (UT ó TCC) ya que tienen distinto volumen, esto justifica su variabilidad, sin embargo de no ser por los dos puntos que sobrepasan la línea roja (Fig. 4.9), dicho parámetro está bajo control ya que su especificación es 24 horas de llenado.

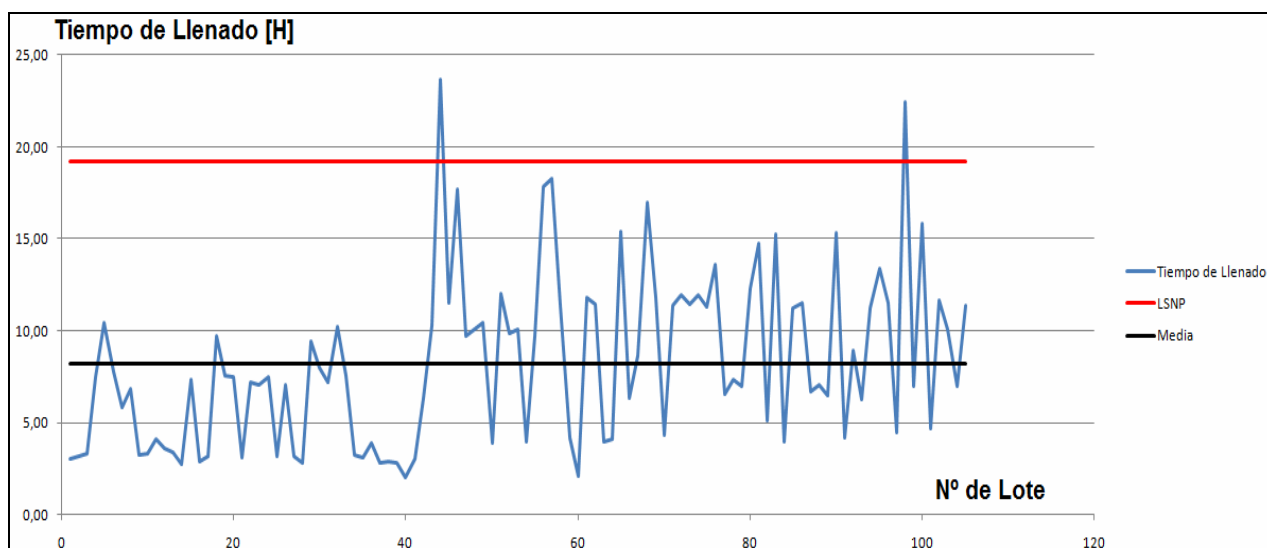


Fig. 4.9 Gráfico Tiempo de Llenado – Control Estadístico.

Su media y desviación estándar son 8,23 [H] y 4,6.

4.1.2.5 NBB

Este parámetro en estricto rigor no está bajo control, ya que la especificación es cero colonias, sin embargo son solo cinco fallas estadísticas y doce fallas de FTR de un total de 90 muestras.

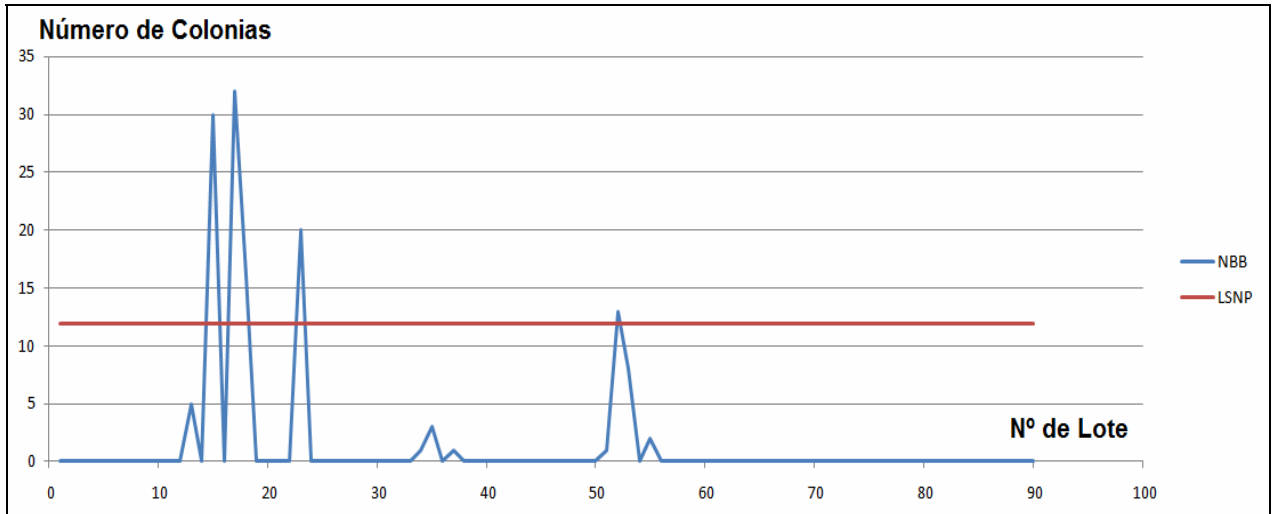


Fig. 4.10 Gráfico NBB. – Control Estadístico.

Los datos graficados en la Fig 4.10 tienen una media y una desviación estándar de 2,1 colonias y 6,9 respectivamente. Este resultado podría interpretarse como “muy malo”, sin embargo debido al tipo de medición puede considerarse como errores de causa especial los 5 datos que superan la línea roja.

4.1.2.6 UBD

Como se mencionó en la sección 2.1.4.2, este parámetro mide las células de origen aerobio presentes en los equipos y cerveza que sean distintos a la levadura, es por esto que pueden estar presentes en bajas cantidades, sin superar las 10 colonias (tolerancia), cambiado ahora último a tolerancia cero.

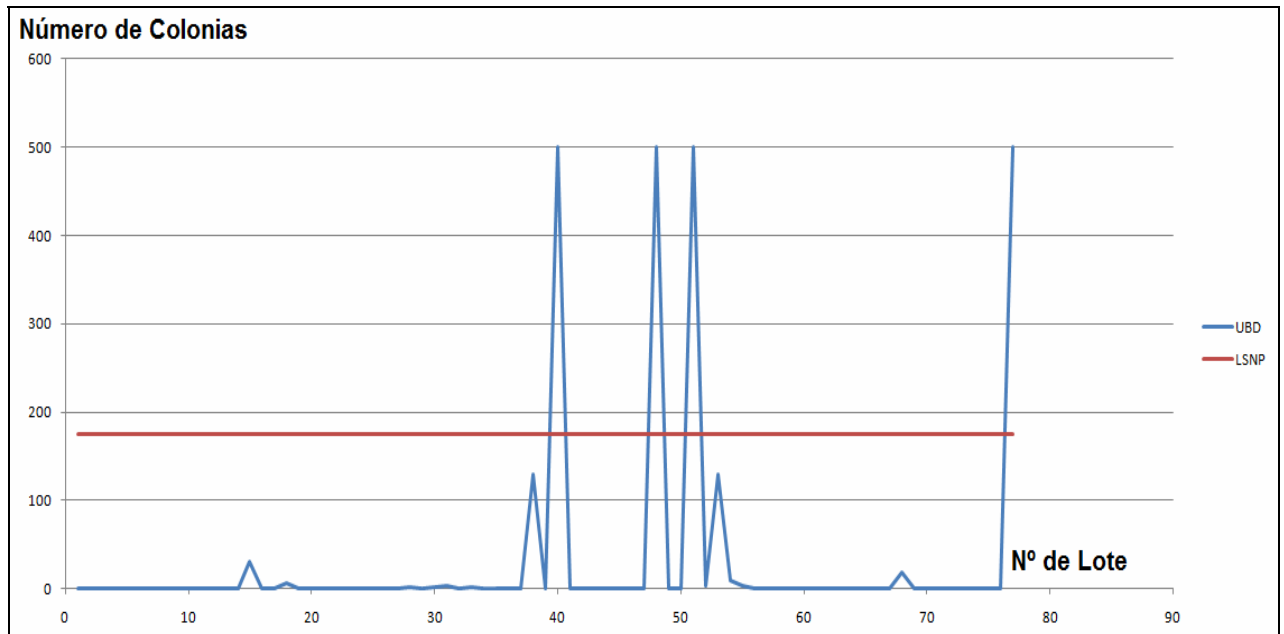


Fig. 4.11 Gráfico UBD. – Control Estadístico.

Tomando en cuenta la Fig. 4.11 y los valores del promedio (31 colonias) y la desviación estándar (113) habría que decir que el parámetro no está bajo control estadístico.

4.1.3 Filtro

4.1.3.1 O₂

Este parámetro, como se mencionó anteriormente, está bastante controlado, ya que es la última etapa de la elaboración de la cerveza y apunta a un estándar de calidad de esta. En la Fig. 4.12, se observa el contenido de O₂ contenido en la cerveza al final del proceso de filtración, medido en los estanques DT antes de pasar al área de envasado. Como se puede apreciar, existen varios puntos consecutivos que coinciden en un valor, esto se debe a que cada lote de filtración es menor, en volumen, a cada lote de fermentación. Se observa además que tiene muy pocas fallas y las que hay que están bajo la línea roja se pueden despreciar, debido a que este parámetro mientras más cercano a cero mejor, por la oxidación de la cerveza.

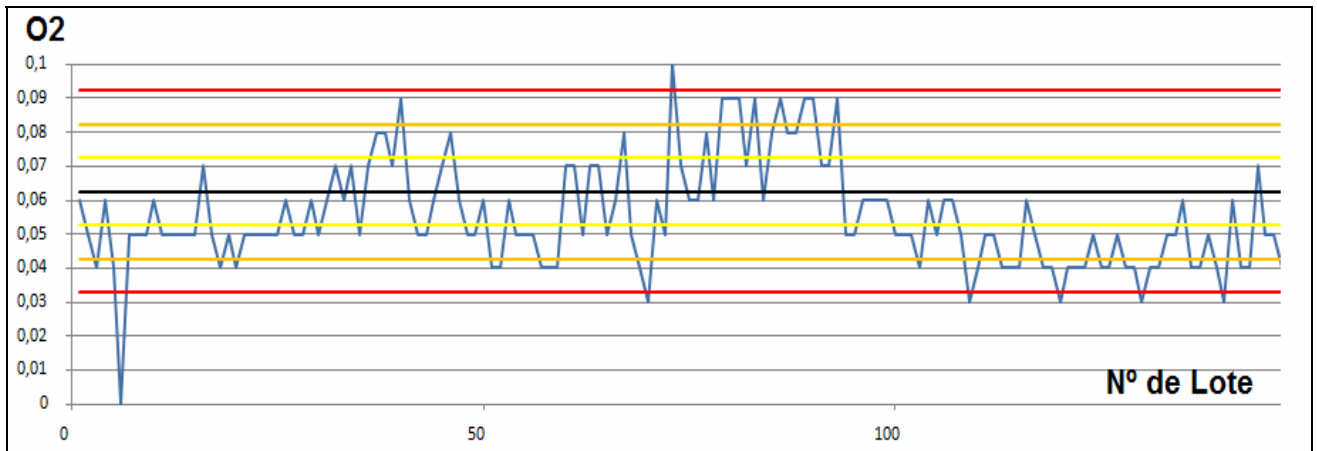


Fig. 4.12 Cantidad de O₂ Contenido en Cerveza Escudo al Final del Proceso de Filtración [ppm]. – Control Estadístico.

Esta tendencia se repite en el resto de los tipos de cerveza, algo inestable a primera vista, pero la mayoría de las veces bajo la especificación.

Por otra parte, según los visto en la sección 2.1.7 sobre como considerar un proceso o variable bajo control, se debería considerar que la variable no está bajo control estadístico, ya que a la altura del lote 80 hay más de 7 valores sobre la media, sin embargo, la especificación para este parámetro es que debe ser menor a 1 [ppm], por lo tanto no estaría siendo una falla considerable.

4.1.3.2 CO₂

Este parámetro, al igual que el O₂ se mide en los estanques DT antes de ser envasada la cerveza, es medido en porcentaje v/v y debe estar en el rango de tolerancia 2,5 – 2,8 % v/v, según esto, y observando la Fig. 4.13 se puede observar que no está tan controlado como el oxígeno. Sin embargo, tiene un promedio de 2,7 % v/v (especificación: 2,65 %v/v) y una desviación estándar de 0,05, lo cual es aceptable para este parámetro. En estricto rigor, no está bajo control, ya que tiene ciertas tendencias no deseadas, como se puede apreciar en los primeros 50 lotes, más de siete puntos seguidos están bajo la línea del promedio.

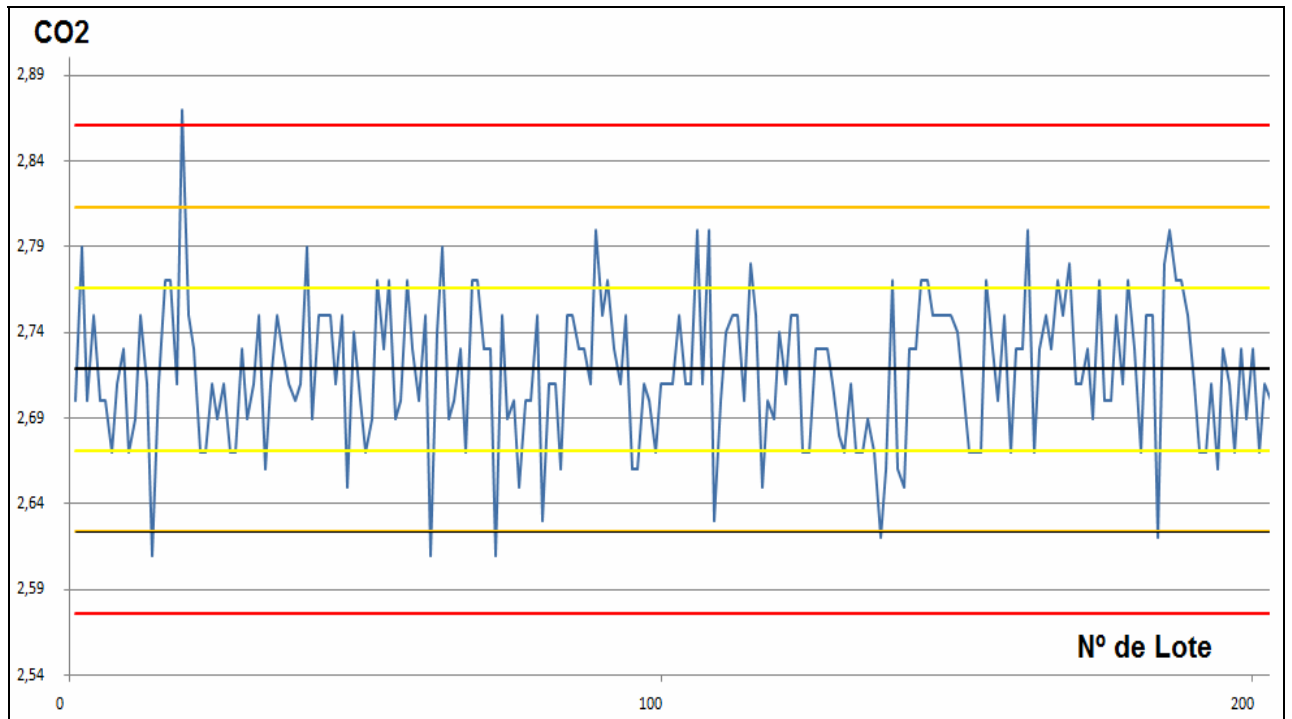


Fig. 4.13 Cantidad de CO₂ Contenido en Cerveza Cristal al Final del Proceso de Filtración. [% v/v] – Control Estadístico

4.1.3.3 Color

Según la especificación de la cerveza Cristal, este parámetro tiene una tolerancia de 6,5 a 8,5 [°EBC]. Al observar la Fig. 4.14, se puede apreciar que el color está bien controlado por el límite superior, ya sea de control o natural del proceso; sin embargo por la parte inferior de este gráfico no está dentro del rango de control (tolerancia), pero si dentro del área de control estadístico. Además, la variable está fuera de control debido a que existe una clara tendencia entre los lotes 15 y 25 además de marcar más de 7 puntos por encima del promedio de las muestras en los lotes finales.

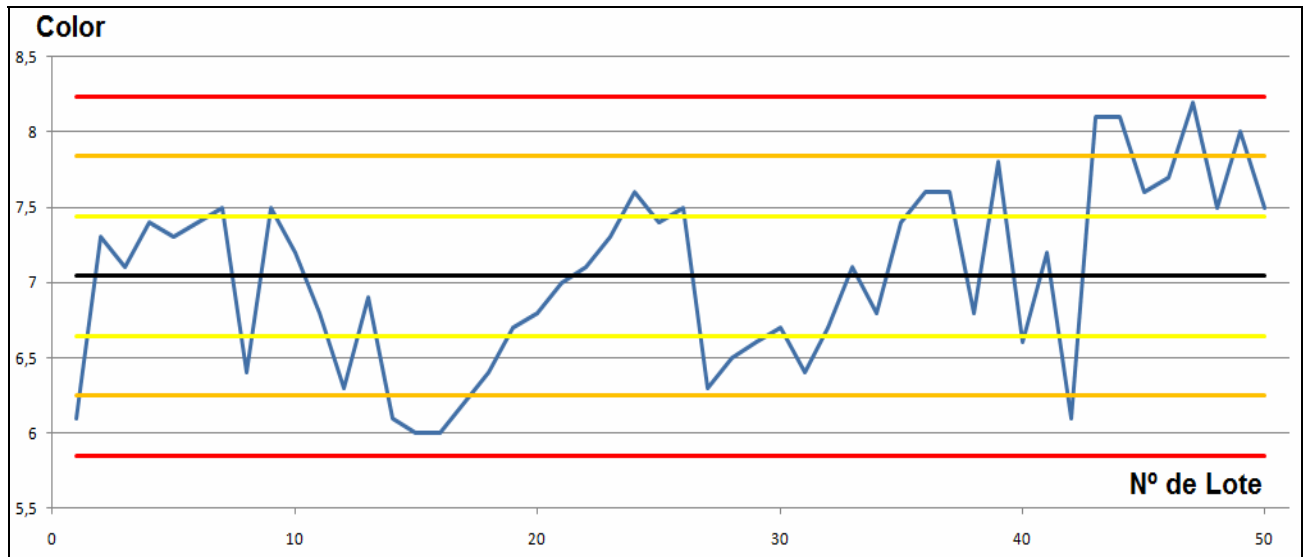


Fig. 4.14 Color de Cerveza Cristal al Final del Proceso de Filtración [°EBC] – Control Estadístico.

4.1.3.4 Turbidez

Como se mencionó anteriormente, este es el parámetro que más fallas tiene históricamente, lamentablemente no se puede apreciar en el gráfico de la Fig. 4.15. Aún así la variable está fuera de control por los puntos 22, 36 y 98.

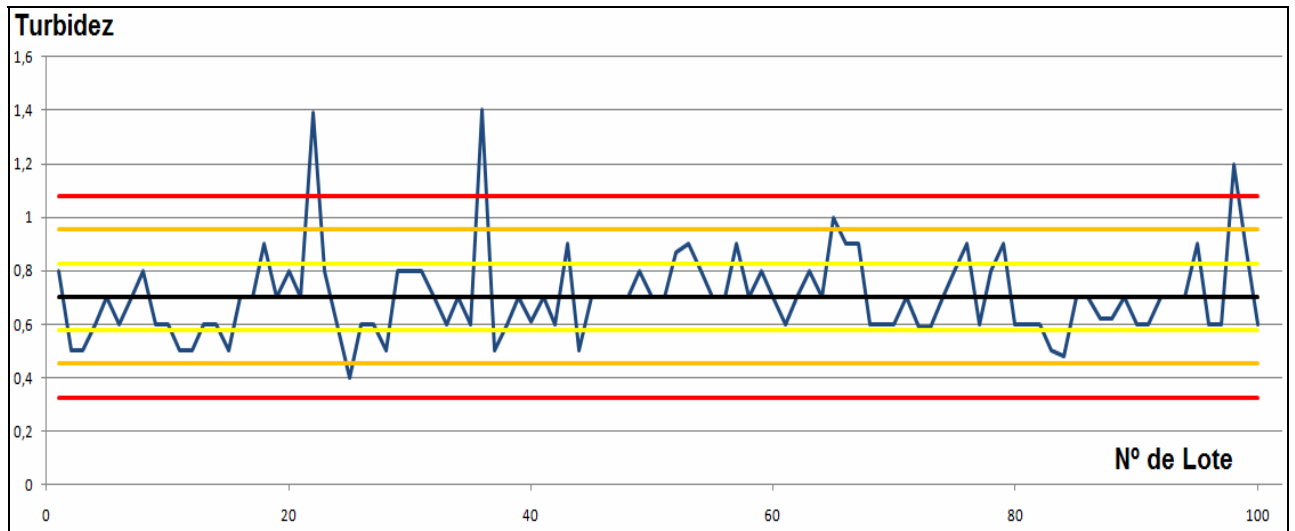


Fig. 4.15 Turbidez en Cerveza al Final del Proceso de Filtración [°EBC] – Control Estadístico.

Con un promedio de 0,7 [°EBC] y una desviación estándar de 0,16 dicha variable pareciera estar bajo control estadístico, sin embargo la mayor causa de reproceso en el área es la turbidez.

4.1.3.5 Extracto Original (E.O.)

Este parámetro parece ser el más controlado, como se observa en la Fig. 4.16, ya que de no ser por el lote número 35, estaría completamente bajo control. No tiene mucha variabilidad, el promedio de los rangos es de 0,08, tiene una desviación estándar de 0,09.

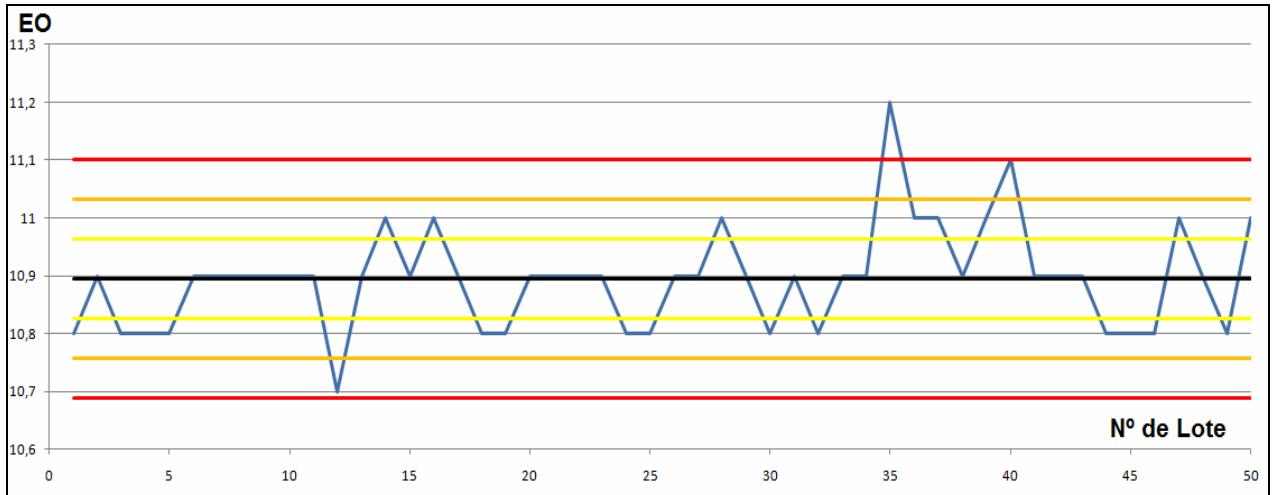


Fig. 4.16 Extracto Original en Cerveza Cristal al Final del Proceso de Filtración. – Control Estadístico.

Al eliminar la medición número 35, la variable de extracto original queda completamente bajo control estadístico, como se puede apreciar en la Fig. 4.17.

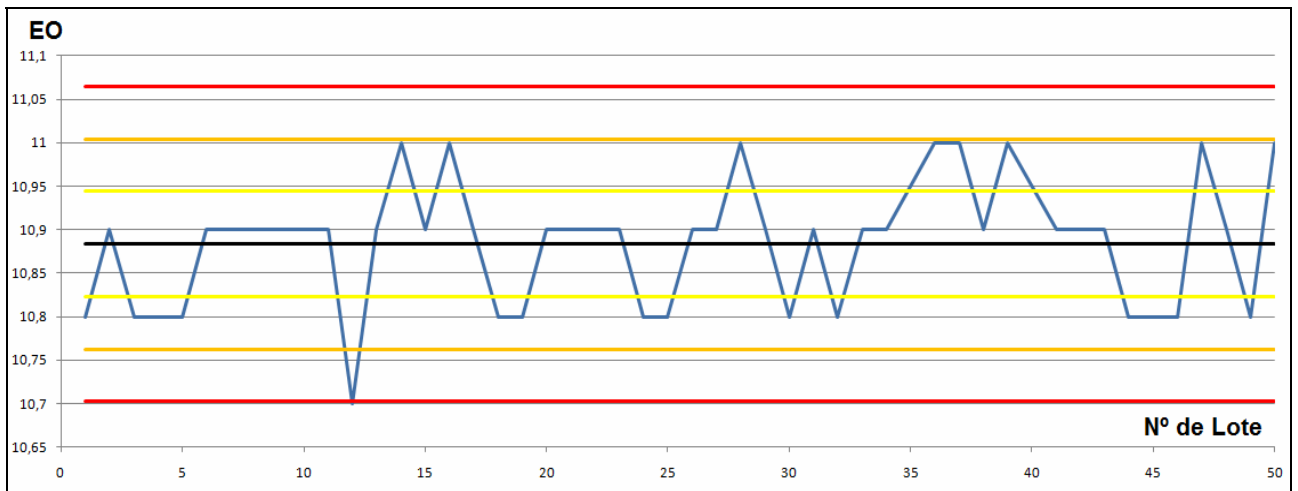


Fig. 4.17 Extracto Original de Cerveza Cristal Bajo Control Estadístico.

5 Propuesta de soluciones

5.1 Área de Cocimiento

Como se mencionó anteriormente, en esta área se evaluó las variables de Extracto Original y Tiempo de Proceso.

5.1.1 Extracto Original (°P)

El Extracto Original es medido al final del proceso (enfriamiento) por el encargado de proceso de turno, mediante un toma muestra (Fig. 5.1) ubicado inmediatamente después del enfriador de placas. La muestra es medida con un instrumento¹³ (Fig. 5.2) que entrega el extracto en unidades de Grado Plato [°P], unidad explicada en la sección 2.1.4.1, el cual entrega la concentración de extracto y la temperatura a la cual fue medida¹⁴.

El proceso de elaboración del mosto para CM's 6, 7 y 8 sólo se componen de malta, agua y lúpulo. Estos tipos de mosto, entregan muy pocas fallas en los resultados finales de Extracto Original, por lo que el problema radica en los cocimientos de CM 4 los cuales tienen por componente Agua, malta, arroz (adjunto) y lúpulo.

Es por esto que se pidió analizar la calibración de la balanza tipo romana y qué influencia tiene este en el proceso anterior.

Este cambio de equipos incluye el cambio de la romana, sistema de recepción del arroz antiexplosivo y sistema de limpieza. Con esto se pretende mejorar la precisión de la adición del adjunto así como también mejorar los tiempos de llenado de arroz a los autoclaves.

¹³ Instrumento marca Anton Paar, Modelo DMA 35N. Indica el Grado Plato (°P) de la muestra y la temperatura a la que es medida.

¹⁴ Temperatura óptima de medición: 20 °C con una tolerancia de 2 °C



Fig. 5.1 Tomamuestra de Mosto Después del Intercambiador de Placas.



5.2 Instrumento de Medición de Extracto.

Se estima además, que con la mejora en el tiempo de llenado de arroz se podría alcanzar la capacidad nominal del área de cocimientos de 24 lotes por día, sin embargo esto no mejoraría el FTR del tiempo de proceso, ya que este se comienza a contar a partir de la adición del arroz a los maceradores, proceso que ocurre después del llenado de autoclaves.

El sistema actual de llenado de arroz, está diseñado para entregar el adjunto a los maceradores a razón de 6 [ton/h] y 50 [Kg/Golpe], lo que traducido a tiempo equivale a 42 minutos de utilización de este equipo.

El nuevo sistema de alimentación de arroz a los maceradores promete una velocidad de llenado de 10 [ton/h] y los mismos 50 [Kg/Golpe] lo que equivale, en tiempo, a 25,2 minutos de utilización del nuevo sistema.

El FTR de tiempo de proceso, una vez que se observó la desviación de cada paso en los tiempos patrones por los que se guían, se tomó una serie de muestras (67) correspondientes a la producción semanal de cocimientos, analizándose el promedio y desviación de cada paso que está disponible en el registro del sistema de control Botec, para generar una planilla como se muestra parte de ella en la Tabla 5.1.

Equipo	Etapa	n= 67	
		Promedio	Desviación STD
Molino de Malta	llenado con malta	0:15:10	0:10:02
	Esperando Macerador	0:14:05	0:54:26
	Precalentar	0:00:38	0:00:10
	Inicio Rodillos	0:03:30	0:00:09
	Remojo Principal	0:00:33	0:00:05
	Molienda Principal	0:41:41	0:03:12
Macerador	espera para Maceracion (1)	0:01:11	0:02:14
	maceracion (2)	0:49:32	0:03:17
	ajuste temperatura (4)	0:00:28	0:01:33
	reposo (5)	0:24:52	0:00:52
	esp. llenar de Autoclave (6)	0:06:18	0:09:50
	llenando de Autoclave (7)	0:10:26	0:04:21
	ajuste temperatura (8)	0:01:11	0:01:12
	reposo (9)	0:42:59	0:00:08
	calentar (10)	0:09:10	0:00:44
	reposo (11)	0:15:02	0:00:13
	tomar muestra (12)	0:07:06	0:08:37
	calentar (13)	0:04:32	0:00:40

Tabla 5.1 Parte de planilla que entrega el tiempo por equipo y por paso en el proceso de elaboración de mosto.

De esta forma se encontró una diferencia de alrededor de 27 minutos en promedio en los puntos de “reposo 9”, “reposo 11” y “UADL”. La propuesta a estos

resultados es que deberían ser analizados por gerencia técnica para cambiar la especificación y/o tolerancia al tiempo total del FTR tiempo de proceso.

5.1.2 Optimización del sistema de enfriamiento para el área de fermentación

5.1.2.1 Análisis de Sensibilidad

En primer lugar se realizó un análisis de sensibilidad mediante el método de regresión multivariable¹⁵, para saber cuáles de estas son manipulables y cuáles las dependientes. Así como también las variables de mayor influencia en la que se quiere controlar. De esta manera se obtiene una ecuación de la siguiente forma:

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 X_{i1} + \dots + \beta_k X_{ik} \text{ Ec. 5.1}$$

Para esto, se normalizaron los datos de hectolitros de siembra, presión de fermentación, temperatura de fermentación, extracto contenido en el mosto antes de la fermentación y la velocidad de fermentación, siendo esta última la variable dependiente que se quiere controlar.

$$N(X_i) = \frac{X_i - \bar{X}}{\sigma} \text{ Ec. 5.2}$$

Una vez normalizados los datos se construyó la matriz de las variables independientes y dependientes como se muestra a continuación:

$$Y = \begin{bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ \vdots \\ Y_n \end{bmatrix}; \quad X = \begin{bmatrix} 1 & X_{11} & X_{12} & \dots & X_{1k} \\ 1 & X_{21} & X_{22} & \dots & X_{2k} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & X_{n1} & X_{n2} & \dots & X_{nk} \end{bmatrix}; \quad \beta = \begin{bmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \vdots \\ \beta_k \end{bmatrix}$$

¹⁵ Probabilidad y Estadística, Cap: Regresión Lineal, A. Mora et al.

Donde Y_i son las mediciones de la variable dependiente, $X_{i,j}$ es la i -ésima medición de la j -ésima variables independiente, para este caso estos valores estan normalizados. Luego se multiplicó la matriz inversa X por la matriz Y para obtener los coeficientes β_i de la ecuación 5.1.

$$\begin{bmatrix} 1 & X_{11} & X_{12} & \dots & X_{1k} \\ 1 & X_{21} & X_{22} & \dots & X_{2k} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & X_{n1} & X_{n2} & \dots & X_{nk} \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ \vdots \\ Y_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \vdots \\ \beta_n \end{bmatrix}$$

Así se obtuvo los coeficientes de la ecuación 5.1 los cuales en valor absoluto entregan el peso relativo de cada una de las variables independientes X_k .

La variable analizada fue la velocidad de fermentación (VF), la cual depende de las siguientes variables:

- Volumen de levadura dosificada a los estanques de fermentación (VS)
- Extracto del mosto recepcionado en los estanques fermentadores. (°P)
- Temperatura de fermentación.(T)
- Presión de fermentación.(P)

El resultado que se obtuvo es el siguiente:

$$VF = 4,32 + 17,5 \cdot [VS] + 13,3 \cdot [^{\circ}P] + 22,5 \cdot [T] + 10,9 \cdot P \quad \text{Ec. 5.3}$$

El orden de prioridad de estas variables es el siguiente:

$$T (22,2\%) \rightarrow VS (17,35\%) \rightarrow ^{\circ}P (14,4\%) \rightarrow P (10,9\%)$$

Por otra parte, al saber que el parámetro que entrega más errores es la velocidad de fermentación se calculó la frecuencia de fallos de la velocidad en cada uno de los estanques fermentadores, obteniéndose aquellos que más fallan. Resultó ser el TCC 62 el estanque con mayor cantidad de fallas para el parámetro analizado, quedando a continuación de este estanques TCC del grupo de los 50.

5.1.2.2 Variable Objetivo: Temperatura de TCC

Una vez conocida la variable a manipular y los estanques que más fallan, se continuó por medir la temperatura de forma directa a través de los toma muestras y comparándola con la que indica el sistema de control. De esta forma se comprobó que los sensores estaban descalibrados ya que entregaron una diferencia de entre 1 a 10 °C.

Posteriormente, se realizó el cálculo de ISE¹⁶ del sistema de control de temperatura. Para esto se coordinó con los operadores del área para saber cuándo se realizaría un cambio de set-point y poder hacer las anotaciones respectivas. Se midió cada una hora la temperatura entregada por el sistema, la cual se comparó con la del set-point, esta diferencia se normalizó y se hizo el cálculo de la respectiva integral, entregando como resultado el valor de la integral mostrado en la Fig. 5.4.

Tiempo [h]	Temperatura	SP	SP-Tº	N(SP-Tº)	F(x)	Ai			
1	12,3	16	3,7	1,264911064	1,6				
1	12,4	16	3,6	0,632455532	0,4	1		Int = 16,8	
1	12,5	16	3,5	0	0	0,2			
1	12,6	16	3,4	-0,632455532	0,4	0,2			
1	12,7	16	3,3	-1,264911064	1,6	1			
1	12,9	16	3,1	-2,529822128	6,4	4			
1	13,1	16	2,9	-3,794733192	14,4	10,4			
			3,5						
			0,1581139						

Fig. 5.4 Cálculo del ISE del Sistema de Control de Fermentación.

¹⁶ Integral Square Error: Integral del Error al Cuadrado. Criterio de comportamiento de los sistemas de control.

Debido a que este valor es muy alto, se debe estudiar el sistema de abastecimiento de amoníaco para conseguir mejorar dicho error y por ende la eficiencia en el uso de los estanques TCC.

5.1.2.3 Optimización

Es sistema a optimizar consta de un estanque de fermentación tipo Cilindro-Cónico, enfriado por amoníaco que circula por fuera del cono del estanque por un sistema de tuberías de sección cuadrada como se muestra en la Fig. 5.5.

El proceso que se optimizó, comienza una vez finalizada la fermentación y termina al obtenerse la temperatura requerida de 5 °C

Para esto, se modeló el proceso de enfriamiento de la cerveza que ocurre en los estanques tipo TCC (Fig. 5.5), considerando los parámetros que afectan a la variable en cuestión: la temperatura dentro de los estanques de fermentación. Estas variables son las siguientes:

- Flujo de amoníaco
- Temperatura del amoníaco
- Temperatura del estanque al finalizar la fermentación
- Temperatura objetivo del estanque para cortar la fermentación
- Entalpías de entrada y salida del amoníaco

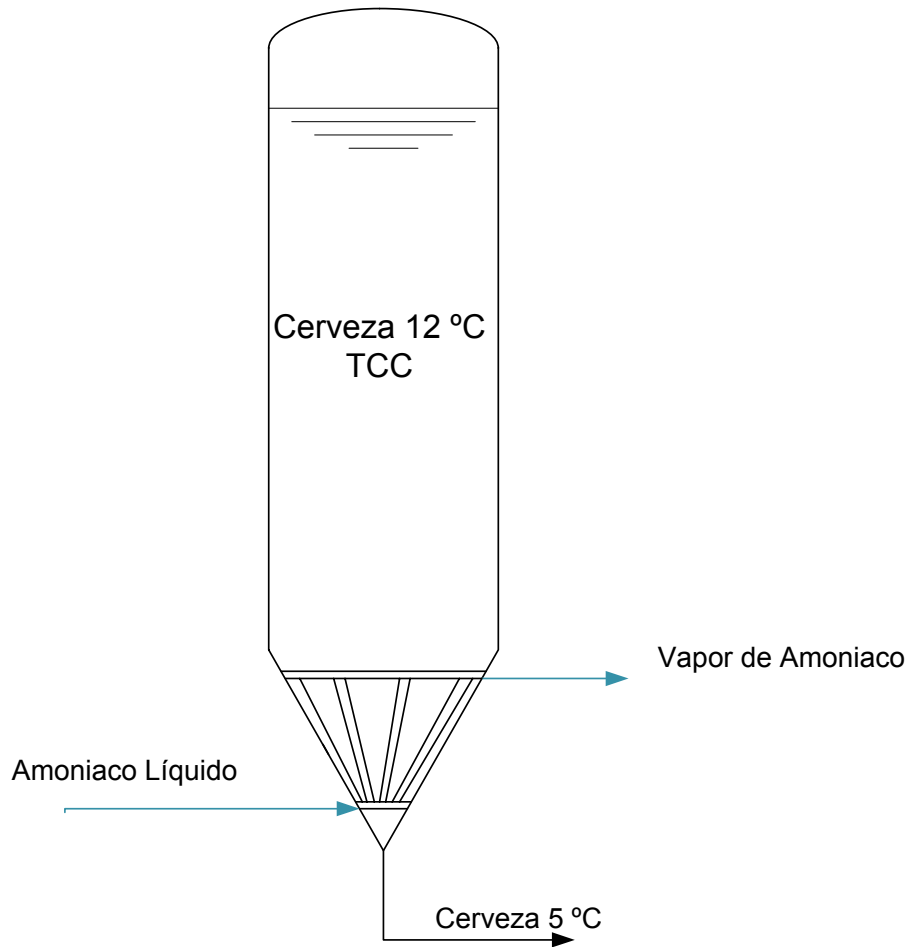


Fig. 5.5 Esquema de enfriamiento de cerveza en estanques tipo TCC.

5.1.2.3.1 Balance de Materia Amoniaco

El balance de materia del amoníaco (Ec. 5.4) aporta solo la demostración de continuidad.

$$\frac{dm}{dt} = \dot{m}_e - \dot{m} \quad (5.4)$$

$$\frac{dm}{dt} = 0 \quad (5.5)$$

$$\dot{m}_e = \dot{m} \quad (5.6)$$

Donde,

\dot{m} :

Flujo de amoníaco a lo largo de las canalizaciones de enfriamiento.

Una vez resuelto este balance se puede resolver el de energía.

5.1.2.3.2 Balance de Energía

Debido a que el proceso es semi batch, se considera en el balance de energía (Ec. 5.7) una acumulación de esta por parte de la cerveza.

Además no se consideran pérdidas de energía, debido a que los conos y la parte cilíndrica de los estanques está aislada del ambiente.

$$\frac{dH}{dt} = \dot{m} \cdot H_e - \dot{m} \cdot H + Q_m \quad (5.7)$$

$$H = mc \cdot C_p \cdot \Delta T \quad (5.8)$$

Donde:

H: Entalpía del amoníaco a la salida

He: Entalpía del amoníaco a la entrada

$\frac{dH}{dt}$: Acumulación de energía en la cerveza.

mc: Masa de cerveza en el estanque

ΔT : Diferencia de temperatura entre el comienzo del enfriamiento de la cerveza y el fin de éste.

C_p : Capacidad calorífica de la cerveza.

Q_m : Calor retirado por el sistema.

Como consideración en esta etapa del proceso, asumió que el amoniaco se encuentra como líquido saturado a la entrada del proceso y como vapor a la salida de éste (Fig. 5.5).

Luego de despejar el flujo de amoniaco e integrar la ecuación resultante, se obtiene la cantidad de masa de amoniaco necesaria para enfriar el lote completo de cerveza (320 m³).

Por otra parte está el balance de momento (Ec. 5.9) que entrega la energía mecánica necesaria para comprimir esta cantidad de amoniaco desde 2,5 [bar] (a la salida de los equipos de enfriamiento) hasta los 11 [bar].

$$\frac{P_2}{\rho_2} - \frac{P_1}{\rho_1} + \frac{\Delta v^2}{2 \cdot g} + z = \Delta H \quad (5.9)$$

Sin embargo, estamos trabajando con la compresión de un gas a líquido, por lo que se recurrió a la ecuación de compresión real politrópica. (Ec. 5.10)

$$\frac{P_2}{P_1} = \left[1 + \frac{C_1^2}{2 \cdot g \cdot C_p \cdot T_1 \cdot \eta_i} \cdot \left(1 - \frac{C_2^2}{C_1^2} \right) \right]^{\frac{n}{n-1}} \quad (5.10)$$

Con esta ecuación, parámetros operacionales y el balance de momento, se obtiene la energía necesaria para la compresión del amoniaco a los distintos tiempos requeridos. Por ser considerado como líquido y vapor saturado respectivamente, es

que estas presiones (Tabla 5.2) definen el resto de las variables (temperaturas y volúmenes específicos).

P ₁ [bar]	2,5
P ₂ [bar]	11

Tabla 5.2: Parámetros operacionales en la compresión del amoniaco

Con la energía de compresión y considerando una eficiencia del 50% para los compresores, se calculó la potencia requerida para comprimir el amoniaco en los tiempos requeridos, paralelo a esto se obtuvo la razón de producción a las 16 horas (tiempo actual de demora de enfriamiento) y luego la razón entre la potencia y la producción a las 16 horas.

Ajustando esta razón, [KW/m³] versus el tiempo, a una parábola se obtuvo la potencia y tiempo óptimo requerido para comprimir el amoniaco y enfriar la cerveza, respectivamente como se muestra en la ecuación 5.11.

$$\left[\frac{KW}{m^3} \right] = 2 \cdot 10^{-5} \cdot t^2 - 4 \cdot 10^{-4} \cdot t + 7,8532 \quad (5.11)$$

De esta función se obtuvo un óptimo de 10 horas y 4000 [KW] de potencia distribuidos dentro de los 9 compresores que posee la empresa de 1160 [KW] aproximadamente.

6 Discusiones y Conclusiones

Concluido el trabajo, es posible diferenciar dos tipos de conclusiones: las relativas al proceso estudiado en la misma planta y sus parámetros examinados y las correspondientes al trabajo posterior de optimización mediante la aplicación de balances en un proceso específico.

En base a los objetivos del proyecto se realizó el estudio estadístico del proceso de elaboración de la cerveza tomando como referencia los indicadores de proceso y de calidad de las 3 áreas de la planta tales como tiempo de proceso, velocidad de fermentación, CO₂ disuelto, entre otros.

De este control estadístico no fue posible obtener resultados concluyentes del proceso ya que la planta estaba siendo sometida a muchos cambios, tanto de expansión como de mantenimiento y reemplazo de equipos por efectos del terremoto del 27/02/2010.

En el área de cocimiento, se cuenta con dos líneas de comienzo del proceso de elaboración del mosto, la alimentación de malta y de arroz, en el último de los cuales se detectó la mayor cantidad de problemas. La calibración de la romana de arroz mejoró la precisión en la razón de empaste en los cocimientos de CM 4, que son los que utilizan arroz en su receta. Esto mejoraría el FTR de extracto (o °P).

Por otra parte, en la etapa de filtración del mosto con orujo en el filtro Lauter, donde se realiza un lavado de este para una mayor extracción de los azúcares, en la medición de grado plato (°P) correspondiente a este paso, existe una variabilidad considerable en la última agua de lavado (UADL) con un promedio de 4,3 °P y una desviación estándar de 1,3. Debido a que el extracto depende de la procedencia de la materia prima y CCU mantiene un número de proveedores relativamente alto para evitar el monopolio, es poco factible mantener estandarizado el cálculo de carga de arroz y malta según la cantidad de extracto que estos componentes posean.

En la etapa de cocimiento se tiene el control del tiempo de proceso como variable FTR. Como se mencionó, el cambio del sistema de alimentación de arroz (romana, limpiadora, despedradora, etc) no afectará a la variable en cuestión ya que este tiempo comienza a medirse justo después de este proceso, sin embargo mejoraría la cantidad de lotes por día que pueden producirse en esta área, mejorando su tiempo de procesamiento de arroz de 6 [ton/h] a 10 [ton/h] disminuyendo el tiempo en 17 minutos por lote. Además, en el periodo de permanencia del memorista en la planta, se comenzó a cambiar el sistema de control de la línea 1 (de Braumat a Botec) para que haya un sistema unificado de control y no tener diferencias en las planillas ni en los métodos de mediciones y control. Esto mejoraría la reproducibilidad de la receta en el ámbito de cantidad de trasiego de mosto de equipo a equipo.

Del análisis de sensibilidad realizado a las variables de las que depende la velocidad de fermentación, se obtuvo que la de mayor influencia es la temperatura, por lo que se propuso realizar la calibración de sensores de temperatura cada semana, en lugar de cada dos semanas. Esto evitaría una lectura errónea de los operadores y se llevaría a cabo las tareas en forma oportuna.

Dentro de las mediciones de temperatura, se midió el error cuadrático del sistema de control de esta variable obteniéndose de datos normalizados un valor de aproximadamente 16. Esto llevó a reducir el tiempo de enfriamiento de la cerveza. Con esto se optimizó el sistema de compresión de amoníaco y el tiempo de enfriamiento, llegando a reducir de 16 a 10 horas, lo que implica un aumento teórico en la producción de volumen de cerveza solo para esta área de un 60%. No se consideró la capacidad del paso siguiente de filtración, ya que este estaba sufriendo modificaciones al momento de finalizar los 6 meses como memorista en la planta.

El aumento en la potencia necesaria se ve justificada por el equipamiento disponible en el área de abastecimiento de 9 compresores de amoníaco de aproximadamente 1.000 [KW] cada uno.

Finalmente cabe destacar que la experiencia lograda es de un inmenso valor en lo profesional, al poder tener la oportunidad de conocer a fondo un proceso industrial para un producto de consumo humano y específicamente su control de calidad ligando todo esto a la aplicación de las técnicas de la ingeniería para optimizar procesos, lográndose una unión integral de gran beneficio entre la industria y la Universidad.

7 Bibliografía

Kunze, W. (1999)., Technology Brewing and Malting. Pp. 171 – 416. Berlin: VLB.

Briggs, D. Boulton, Ch. Brookes, P. Stevens, R. (2004). Brewing science and practice, woodhead publishing limited.

Mora, A. Cid, L. Valenzuela, M. (1996). Probabilidades y Estadística: pp. 305 – 308.

Ferreiro, P, (2002). Control Estadístico (Y estrategias seis sigma).

Allende, R. (2008). Control Estadístico de calidad.

Ferreiro, O. (2010). Presentación Control Estadístico de Procesos.

Anexos

Anexo I

Normalización y Análisis de Sensibilidad

Datos reales obtenidos de la planilla de control diario del área de fermentación, en donde se visualiza el número del estanque que fue medido, volumen de siembra (inoculación), grado plato, temperatura, presión y la variable dependiente: Velocidad de Fermentación.

TCC/UT	VS	ºP	Tº	Pº	Velocidad de Fermentación
62	24	16,26	12	0,4	1,572
65	16	17,85	12,5	0,4	1,83
123	23	17,1	12	0,4	2,62
101	49	16,46	12	0,4	2,512
75	55	16,23	12	0,4	2,646
102	55	15,62	12	0,4	2,464
105	55	15,15	12	0,4	2,43
71	55	15,92	12	0,4	2,564
112	55	15,7	12	0,4	2,5
52	25	16,33	12	0,4	2,206
53	25	15,9	12	0,4	2,5
103	55	15,91	12	0,4	2,002
111	55	16,24	12	0,4	2,608
63	30	16,06	12	0,4	2,692
64	30	17,27	12	0,4	2,814
122	58	16,78	12	0,4	2,756
114	58	16,94	12	0,4	2,688
74	58	16,88	12	0,4	2,736
104	58	16,66	12	0,4	2,632
72	58	16,72	12	0,4	2,704
124	58	16,68	12	0,4	2,656
113	58	16,44	12	0,4	2,568
54	120	16,73	15	0,4	2,346
55	30	16,83	12	0,4	2,426
51	30	16,8	12	0,4	1,82
53	18	16,4	16	1,4	2,6

123	50	16,3	12	0,4	2,68
73	48	16,42	12	0,4	2,684
101	40	16,66	12	0,4	2,692
75	45	16,73	12	0,4	2,486
105	45	16,55	12	0,4	2,53
52	19	16,76	12	0,4	2,332
62	19	16,43	12	0,4	1,826
71	42	16,85	12	0,4	2,77
65	220	16,4	15	0,4	2,44
102	34	16,9	12	0,4	2,7
112	43	16,53	12	0,4	2,706
103	41	16,53	16	0,6	2,646
111	44	16,2	12	0,6	2,5
63	9	14,85	12	0,6	2,47
122	40	16,58	12	0,4	2,716
64	25	16,33	12	0,4	2,546
114	39	16,54	12	0,4	2,668
74	45	16,45	12	0,4	2,61
11	240	16,73	15	0,4	2,626
104	33	16,72	12	0,4	2,744
51	9	17,1			3,42
72	37	16,54	12	0,4	2,668
54	16	16,33	1	0,6	2,646
124	36	16,02			2,404
Promedio	48,6	16,4662	12,1354167	0,4375	2,52804
σ	41,7636694	0,50057881	1,95355536	0,15246206	0,299052515

Luego se normalizaron los datos según la siguiente ecuación:

$$N(X_i) = \frac{X_i - \bar{X}}{\sigma}$$

Tabla de datos normalizados

VS	ºP	Tº	pº	Velocidad de Fermentación
-0,589	-0,412	-0,069	-0,246	-3,197
-0,781	2,764	0,187	-0,246	-2,334
-0,613	1,266	-0,069	-0,246	0,308
0,010	-0,012	-0,069	-0,246	-0,054
0,153	-0,472	-0,069	-0,246	0,394
0,153	-1,690	-0,069	-0,246	-0,214
0,153	-2,629	-0,069	-0,246	-0,328
0,153	-1,091	-0,069	-0,246	0,120
0,153	-1,531	-0,069	-0,246	-0,094
-0,565	-0,272	-0,069	-0,246	-1,077
-0,565	-1,131	-0,069	-0,246	-0,094
0,153	-1,111	-0,069	-0,246	-1,759
0,153	-0,452	-0,069	-0,246	0,267
-0,445	-0,811	-0,069	-0,246	0,548
-0,445	1,606	-0,069	-0,246	0,956
0,225	0,627	-0,069	-0,246	0,762
0,225	0,947	-0,069	-0,246	0,535
0,225	0,827	-0,069	-0,246	0,695
0,225	0,387	-0,069	-0,246	0,348
0,225	0,507	-0,069	-0,246	0,588
0,225	0,427	-0,069	-0,246	0,428
0,225	-0,052	-0,069	-0,246	0,134
1,710	0,527	1,466	-0,246	-0,609
-0,445	0,727	-0,069	-0,246	-0,341
-0,445	0,667	-0,069	-0,246	-2,368
-0,733	-0,132	1,978	6,313	0,241
0,034	-0,332	-0,069	-0,246	0,508
-0,014	-0,092	-0,069	-0,246	0,522
-0,206	0,387	-0,069	-0,246	0,548
-0,086	0,527	-0,069	-0,246	-0,141
-0,086	0,167	-0,069	-0,246	0,007
-0,709	0,587	-0,069	-0,246	-0,656
-0,709	-0,072	-0,069	-0,246	-2,348
-0,158	0,767	-0,069	-0,246	0,809
4,104	-0,132	1,466	-0,246	-0,294
-0,350	0,867	-0,069	-0,246	0,575
-0,134	0,127	-0,069	-0,246	0,595

-0,182	0,127	1,978	1,066	0,394
-0,110	-0,532	-0,069	1,066	-0,094
-0,948	-3,229	-0,069	1,066	-0,194
-0,206	0,227	-0,069	-0,246	0,629
-0,565	-0,272	-0,069	-0,246	0,060
-0,230	0,147	-0,069	-0,246	0,468
-0,086	-0,032	-0,069	-0,246	0,274
4,583	0,527	1,466	-0,246	0,328
-0,374	0,507	-0,069	-0,246	0,722
-0,948	1,266	-6,212	-2,870	2,983
-0,278	0,147	-0,069	-0,246	0,468
-0,781	-0,272	-5,700	1,066	0,394
-0,302	-0,891	-6,212	-2,870	-0,415

Luego para armar las matrices y encontrar los coeficientes β_k de la ecuación 5.1 se añadió una columna de 1's para aplicar la ecuación según bibliografía.

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 X_{i1} + \dots + \beta_k X_{ik} \quad \text{Ec. 5.1}$$

Resultando de esta multiplicación de matrices lo siguiente:

$$\begin{bmatrix} 0,02 & -0,001 & -4,66 \cdot 10^{-6} & 0,002 & 2,69 \cdot 10^{-4} \\ -0,001 & 0,025 & 0,001 & -0,008 & 0,007 \\ 0,005 & 0,001 & 0,021 & -0,001 & 0,004 \\ 0,001 & -0,008 & -0,002 & 0,013 & -0,010 \\ 2,5 \cdot 10^{-4} & 0,007 & 0,003 & -0,010 & 0,023 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} -0,043 \\ 0,175 \\ 0,133 \\ -0,225 \\ 0,110 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,043 \\ 0,175 \\ 0,133 \\ 0,225 \\ 0,1095 \end{bmatrix}$$

Donde la primera matriz corresponde a la inversa de los X_{ik} , la segunda matriz corresponde a la de los Y_i y la última matriz corresponde a los coeficientes β_k .

Estos coeficientes multiplicados por 100, entregan el porcentaje de incidencia que tienen sobre la variable dependiente, es decir:

$$VF = 4,32 + 17,5 \cdot [VS] + 13,3 \cdot [P] + 22,5 \cdot [T] + 10,9 \cdot P \quad \text{Ec. 5.3}$$

Anexo II

Cálculo de ISE del sistema de control en fermentación

En este cálculo se consideró la medición de la temperatura cada una hora a partir del cambio en el set-point, cambiando éste de 12,3 a 16 °C.

Tiempo [h]	Temperatura
1	12,3
1	12,4
1	12,5
1	12,6
1	12,7
1	12,9
1	13,1

Luego se realizó la diferencia y normalización de la temperatura respecto del set-point, aplicando nuevamente la ecuación:

$$N(X_i) = \frac{X_i - \bar{X}}{\sigma}$$

SP-Tº	N(SP-Tº)
3,7	1,265
3,6	0,632
3,5	0
3,4	-0,632
3,3	-1,265
3,1	-2,530
2,9	-3,795

Luego se aplicó la ecuación del error al cuadrado y se aplicó el método del trapecio para encontrar la integral respectiva:

F(x)	Ai
1,6	
0,4	1
0	0,2
0,4	0,2
1,6	1
6,4	4
14,4	10,4

Obteniéndose un total de 16,8.

Anexo III

Balance de Energía

$$\frac{dH}{dt} = \dot{m} \cdot H_e - \dot{m} \cdot H + Q_m$$

Para esto se consideró lo siguiente

$$H = mc \cdot Cp \cdot \Delta T$$

$$mc = 320.000 \text{ [kg]}$$

$$Cp = 4,18 \text{ [KJ/Kg}^\circ\text{C]}$$

$$\Delta T = 11 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$H_e = 116,19 \text{ [KJ/Kg]}$$

$$H = 1425,88 \text{ [KJ/Kg]}$$

$$U = 1200 \text{ [KJ/m}^2\text{*h*K]}$$

$$A = 8 \text{ [m}^2\text{]}$$

$$\Delta T_{LMTD} = 24 \text{ K}$$

Con estos datos y luego de integrar la ecuación del flujo de amoniaco se obtuvo la masa de éste:

Tiempo [h]	Masa NH3 [Kg]
1	11.112
2	10.936
3	10.760
4	10.584
5	10.409
6	10.233
7	10.057
8	9.881
9	9.705
10	9.529
11	9.353
12	9.177
13	9.001
14	8.825
15	8.649
16	8.473
17	8.298
18	8.122
19	7.946
20	7.770

Anexo IV

Balance de Momentum y Optimización

Para este balance se adecuó la ecuación 5.7 que entrega la razón de presiones de entrada y salida para una compresión real politrópica de un gas, restándole uno a cada lado de la ecuación.

$$\frac{P_2}{P_1} = \left[1 + \frac{C_1^2}{2 \cdot g \cdot Cp \cdot T_1 \cdot \eta_i} \cdot \left(1 - \frac{C_2^2}{C_1^2} \right) \right]^{\frac{n}{n-1}} \quad | \quad - \frac{P_1}{P_1}$$

$$P_2 - P_1 = P_1 \left[\left[1 + \frac{C_1^2}{2 \cdot g \cdot Cp \cdot T_1 \cdot \eta_i} \cdot \left(1 - \frac{C_2^2}{C_1^2} \right) \right]^{\frac{n}{n-1}} - 1 \right]$$

Haciendo el reemplazo en la ecuación de Bernoulli queda lo siguiente:

$$\Delta H = \frac{\left[\frac{-160 \cdot 8,314 \cdot m}{17} + \frac{\left(\frac{m}{0,00071} \right)^2}{2 \cdot 9,8} \cdot (0,001394^2 - 0,001378^2) + \frac{101325}{0,001394} \right]}{1000}$$

Esta ecuación contiene los factores de conversión necesarios para que el resultado se entregue en [KJ]

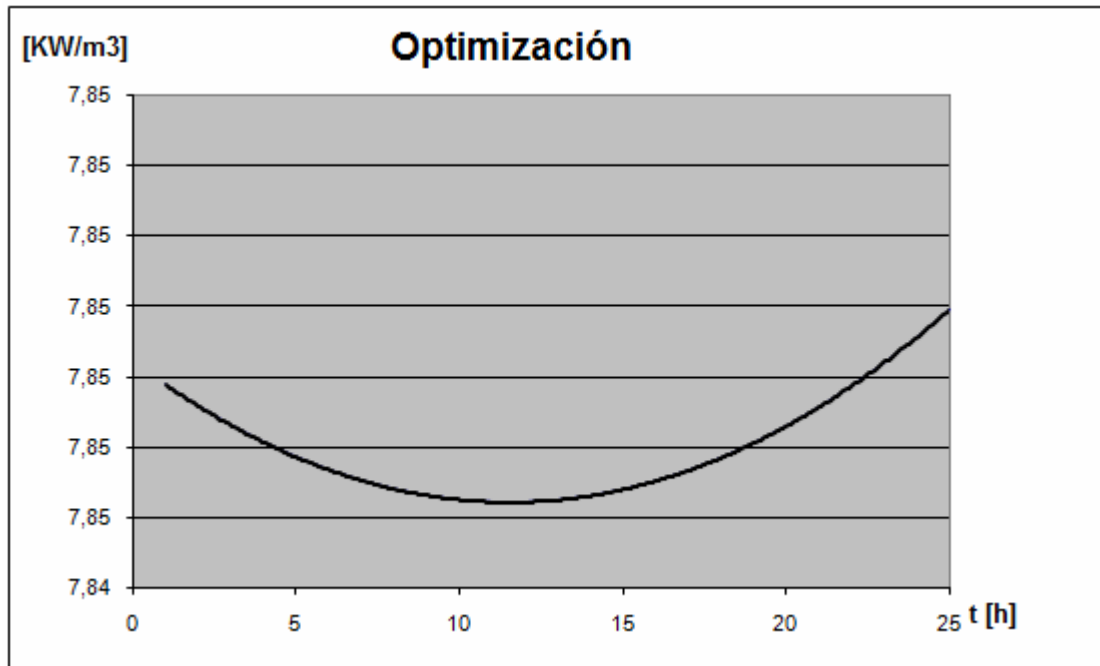
De esta forma se genera la tabla adjunta:

Tiempo [h]	Masa NH3 [Kg]	Trabajo de Compresion [MJ]	Potencia Necesaria [KW]
1	11.112	72.371	40.206
2	10.936	72.368	20.102
3	10.760	72.364	13.401
4	10.584	72.361	10.050
5	10.409	72.358	8.040
6	10.233	72.356	6.700
7	10.057	72.354	5.742
8	9.881	72.352	5.024
9	9.705	72.350	4.466
10	9.529	72.348	4.019
11	9.353	72.347	3.654
12	9.177	72.346	3.349
13	9.001	72.346	3.092
14	8.825	72.346	2.871
15	8.649	72.346	2.679
16	8.473	72.346	2.512
17	8.298	72.346	2.364
18	8.122	72.347	2.233
19	7.946	72.348	2.115
20	7.770	72.350	2.010

Con los resultados obtenidos se puede obtener la producción de cerveza y razón $[KW/m^3]$ que se generaría con los efectos de dichas consideraciones a cada hora calculada.

Tiempo [h]	Potencia Necesaria [KW]	Producción a las 16h (m3)	KW/m3
1	40.206	5.120	7,85
2	20.102	2.560	7,85
3	13.401	1.707	7,85
4	10.050	1.280	7,85
5	8.040	1.024	7,85
6	6.700	853	7,85
7	5.742	731	7,85
8	5.024	640	7,85
9	4.466	569	7,85
10	4.019	512	7,85
11	3.654	465	7,85
12	3.349	427	7,85
13	3.092	394	7,85
14	2.871	366	7,85
15	2.679	341	7,85
16	2.512	320	7,85
17	2.364	301	7,85
18	2.233	284	7,85
19	2.115	269	7,85
20	2.010	256	7,85

Ajustando la razón $[KW/m^3]$ y el tiempo a una ecuación cuadrática, se obtiene la siguiente figura:



Con un ajuste de $R^2 = 1$ y la siguiente ecuación:

$$\left[\frac{KW}{m^3} \right] = 2 \cdot 10^{-5} \cdot t^2 - 4 \cdot 10^{-4} \cdot t + 7,8$$

Luego esta ecuación se derivó respecto el tiempo.

$$\frac{d\left(\frac{KW}{m^3}\right)}{dt} = 4 \cdot 10^{-5} \cdot t - 4 \cdot 10^{-4}$$

Igualando a 0 y despejando t , se obtiene

$$t = \frac{4 \cdot 10^{-4}}{4 \cdot 10^{-5}} = 10 \text{ [h]}$$