

UNIVERSIDAD IBEROAMERICANA

Estudios con Reconocimientos de Validez Oficial por Decreto Presidencial
del 3 de abril de 1981.



“APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA LEAN SIX SIGMA PARA
EL INCREMENTO EN LA REUTILIZACIÓN DE CO₂ EN LA INDUSTRIA CERVECERA DE LA
CIUDAD DE MÉXICO”

CASO DE ESTUDIO

Que para obtener el grado de

MAESTRO EN INGENIERÍA DE CALIDAD

Presenta:

JORGE LUIS HUAMAN BAÑÓN

Director: Mtro. Jorge Francisco Mejía Coba

Lectores: Dr. Erick Guillermo torres Bermúdez

Dr. Hugo Alexer Pérez Vicente

Ciudad de México, México 2025

Contenido

1. INTRODUCCIÓN	8
1.1.1 HIPOTESIS	13
1.1.2 LA IMPORTANCIA DEL CO ₂ EN LA ELABORACIÓN DE CERVEZA	8
1.1.3 ESTUDIO DE CASO	12
1.1.4 RELEVANCIA DEL CO ₂ EN LA INDUSTRIA CERVECERA	10
1.2 OBJETIVOS	14
1.3 JUSTIFICACIÓN DE LA SELECCIÓN DE LA METODOLOGÍA LEAN SIX SIGMA	15
1.4 LEAN SIX SIGMA Y CALIDAD EN EL SERVICIO	16
2. FASE: DEFINIR	21
2.1 CAPTACIÓN DE CO ₂ : LA FERMENTACIÓN Y LA RELEVANCIA EN LA RECUPERACIÓN DE CO ₂	23
2.1.2 DIAGNÓSTICO DEL PROCESO DE FERMENTACIÓN	26
2.1.3 DIAGNÓSTICO DE LOS EQUIPOS DE FERMENTACIÓN	28
2.1.4 DIAGNÓSTICO DE LOS MÉTODOS Y PROCEDIMIENTOS EN EL AREA DE FERMENTACIÓN DE CERVEZA	29
2.1.5 DIAGNÓSTICO DE LOS MANEJO DE CONTROLES VISUALES EN EL AREA DE FERMENTACIÓN DE CERVEZA.....	30
2.2 EL CO ₂ EN LA CARBONATACIÓN DE AGUA PARA DILUIR CERVEZA CONCENTRADA.	31
2.2.1 DIAGNÓSTICO DEL DIAGRAMA DE EQUIPOS: AREA CARBONATACION DE AGUA.....	31
2.2.2 DIAGNÓSTICO DE MAPEO DE PROCESO DE LA CARBONATACION DEL AGUA.....	32
2.2.3 DIAGNÓSTICO DEL EQUIPO MEDICION DE CARBONATACION DE AGUA.....	32
2.2.4 DIAGNÓSTICO DE MÉTODO Y PROCEDIMIENTO PARA DETERMINAR VOLUMEN DE CO ₂ EN LA CARBONATACION DE AGUA	33
2.3 LA INYECCIÓN DE CO ₂ EN LA FILTRACIÓN DE CERVEZA DILUIDA.....	35
2.3.1 DIAGNOSTICO DEL MAPEO DE PROCESO DE LA FILTRACIÓN DE CERVEZA	36
2.3.2 DIAGNÓSTICO DEL EQUIPO MEDICION DE VOLUMEN DE CO ₂ EN LA FILTRACIÓN DE CERVEZA	36
2.3.3 DIAGNÓSTICO DEL MÉTODO Y PROCEDIMIENTO PARA DETERMINAR EL VOLUMEN DE CO ₂ EN LA FILTRACIÓN DE LA CERVEZA	37
2.3.4 DIAGNÓSTICO DEL MANEJO DE CONTROLES VISUALES PARA EL AREA DE FILTRACIÓN DE CERVEZA	38
2.4 ADICION DE CO ₂ EN EL ENVASADO DE CERVEZA.	39

2.4.1 DIAGNÓSTICO DEL MAPEO PROCESO DEL AREA DE ENVASADO	40
2.4.2 DIAGNÓSTICO DEL EQUIPO PARA DETERMINAR VOLUMEN DE CO ₂ EN LA LLENADORA DE CERVEZA.	41
2.4.3 DIAGNÓSTICO DEL MÉTODO Y PROCEDIMIENTO CARBONATACION EN LA LLENADORA DE CERVEZA	41
2.4.4 DIAGNÓSTICO DEL MANEJO DE CONTROLES VISUALES EN EL AREA DE ENVASADO	42
3. FASE MEDIR: EVALUACIÓN DEL SISTEMA DE CAPTACIÓN Y USO DE CO ₂ EN LAS ÁREAS PRODUCTIVAS	43
3.1 EVALUACION DEL SISTEMA DE RECUPERACION DE CO ₂	43
3.1.1 EVALUACION DEL PLAN DE RECOLECCIÓN DE DATOS EN EL AREA DE FERMENTACIÓN .	44
3.1.2 EVALUACION DE PROCEDIMIENTO PARA REALIZAR METODO DE CAPTURA DE CO ₂ EN LOS SALONES DE FERMENTACIÓN.....	45
3.2 USO DE CO ₂ PARA CARBONATACIÓN DE AGUA PARA DILUIR CERVEZA CONCENTRADA	48
3.2.1 EVALUACION DEL PROCEDIMIENTO PARA DETERMINAR VOLUMEN DE CO ₂ EN LA CARBONATACION DE AGUA.....	49
3.3 USO DE CO ₂ : AREA FILTRACIÓN DE CERVEZA	51
3.3.1 EVALUACION DEL PROCEDIMIENTO PARA DETERMINAR VOLUMEN DE CO ₂ EN LA CARBONATACION EN LA FILTRACIÓN DE CERVEZA	52
3.4 USO DE CO ₂ EN EL ENVASADO DE CERVEZA.	54
3.4.1 EVALUACION DEL PROCEDIMIENTO PARA DETERMINAR VOLUMEN DE CO ₂ EN LA LLENADORA DE CERVEZA.....	55
4. FASE ANALIZAR: GESTIÓN Y APLICACIÓN DE USO DE CO ₂ EN LAS ÁREAS PRODUCTIVAS	58
4.1 ANÁLISIS DEL SISTEMA DE RECUPERACIÓN DE CO ₂ EN EL ÁREA DE FERMENTACIÓN.	58
4.2 ANÁLISIS SOBRE LA CARBONATACIÓN DEL AGUA PARA PARA DILUIR CERVEZA CONCENTRADA.	59
4.3 ANÁLISIS SOBRE EL USO Y APLICACIÓN DE CO ₂ PARA LA FILTRACIÓN DE CERVEZA.....	60
4.4 ANÁLISIS SOBRE EL USO Y APLICACIÓN DE CO ₂ PARA ENVASAR DE CERVEZA	61
5. FASE MEJORAR: INCREMENTO EN LA TASA DE RECUPERACIÓN Y USO DE CO ₂	64
5.1 CONTRAMEDIDAS DEL 5 POR QUÉS EN EL AREA DE FERMENTACIÓN	64
5.1.1 MEJORA EN LA EFICIENCIA DE RECUPERACIÓN DE CO ₂ EN EL ÁREA DE FERMENTACIÓN.	64
5.1.2 ESTANDARIZACIÓN PROCEDIMIENTO PARA CONEXIÓN DE TANQUES FERMENTADORES HACIA LA RECUPERACIÓN	66
5.1.3 DETERMINACION DE CONTROLES VISUALES PARA EL AREA DE FERMENTACIÓN	66

5.1.4 CONCLUSIÓN SOBRE LA MEJORA DE LA RECUPERACION DE CO ₂	67
5.2 CONTRAMEDIDAS DEL 5 POR QUÉS DEL AREA DE CARBONATACION DE AGUA	68
5.2.1 MEJORA EN EL USO DE CO ₂ PARA LA CARBONACIÓN DE AGUA PARA PROCESO.	68
5.2.2 MEJORA EN LA PRUEBA DE DETERMINACION DE VOLUMEN DE CO ₂ EN LA CARBONATACION DE AGUA.....	68
5.2.3 CONCLUSIÓN SOBRE LA MEJORA DE USO DE CO ₂ EN LA CARBONATACION DE AGUA. ...	70
5.3 CONTRAMEDIDAS DEL 5 POR QUÉS DEL AREA DE FILTRACIÓN DE CERVEZA	70
5.3.1 MEJORA DE USO DE CO ₂ : AREA FILTRACIÓN DE CERVEZA	71
5.3.3 CONCLUSIÓN SOBRE LA MEJORA DE USO DE CO ₂ EN LA FILTRACIÓN DE CERVEZA.	73
5.4 CONTRAMEDIDAS DEL 5 POR QUÉS DEL AREA DE ENVASADO	73
5.4.1 MEJORA DE USO DE CO ₂ PARA ENVASADO DE CERVEZA	73
6.1 CONTROL EN LA REUTILIZACIÓN DE CO ₂ EN EL ÁREA DE FERMENTACIÓN.....	76
6.2 CONTROL DE UTILIZACIÓN DE CO ₂ PARA LA CARBONACIÓN DE AGUA PARA PROCESO	76
6.3 CONTROL DE UTILIZACIÓN DE CO ₂ PARA LA FILTRACIÓN DE CERVEZA.....	77
6.4 CONTROL DE UTILIZACIÓN DE CO ₂ PARA ENVASADO DE CERVEZA.	77
7. RESULTADOS SOBRE LA APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA SIX SIGMA.	79
8. CONCLUSIONES	82
9. RECOMENDACIONES	85
BIBLIOGRAFÍA.....	86

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Organigrama de equipo de trabajo de la cervecería.....	12
Figura 2. Aspectos importantes y aplicaciones del CO ₂	10
Figura 3. Estrategia de ampliación de DMAIC.	15
Figura 4. Comportamiento de una variable y escala de sigmas.	16
Figura 5. Alcance sobre límites y tolerancia en una variable.	16
Figura 6. Límites y tolerancia de una media en una variable.	17
Figura 7. Diagrama de flujo para atender un proyecto de mejora.....	18
Figura 8. Diagrama de flujo con análisis sistémico.	18
Figura 9. Despliegue de fases DMAIC para caso de mejora.	19
Figura 10. Compra de CO ₂ en el periodo 2022.	21
Figura 11. Tendencia sobre el uso del insumo en 2022.....	21
Figura 12. Tendencia del factor el uso de CO ₂ en 2022, (Cantidad de CO ₂ entre cerveza envasada).....	22
Figura 13. Factor de compra de CO ₂ en el periodo 2022. (CO ₂ comprado – CO ₂ vendido entre cerveza envasada).....	22
Figura 14. Activación de compra de CO ₂ por contingencia de CO ₂	22
Figura 15. Diagrama de flujo para la elaboración de la cerveza.	23
Figura 16. Diagrama de flujo para la captura, purificación y almacenamiento de CO ₂	24
Figura 17. Imagen de un tanque fermentador.	26
Figura 18. Comportamiento de pureza CO ₂	26
Figura 19. Actividades clave en la etapa de fermentación de cerveza.	27
Figura 20. Actividades clave en la etapa de tratamiento de CO ₂	27
Figura 21. Determinación de pureza de CO ₂ de tanque de servicio.	28
Figura 22. Diferencia de equipos para determinación de pureza de CO ₂	28
Figura 23. Rutina de llenado de tanques, conexión atmosfera y conexión hacia recuperación. ..	29
Figura 24. Punto de muestreo de pureza denominada lavadora CO ₂	30
Figura 25. Diagrama de flujo para carbonatar el agua para proceso.	31
Figura 26. Actividades clave en la etapa de carbonatación del agua.	32
Figura 27. Punto de muestreo para determinar contenido de CO ₂ en porcentaje.....	33
Figura 28. Aparato Haffman mide porcentaje CO ₂ en el agua.	33
Figura 29. Muestreo de contenido de CO ₂ en porcentaje en la carbonatación de agua.	34
Figura 30. Diagrama de flujo del sistema de filtración de cerveza.	35
Figura 31. Actividades clave en la etapa de filtración de cerveza	36
Figura 32. Aparato Haffman mide concentración de CO ₂ en la cerveza.	36
Figura 33. Punto de muestro para determinar contenido de CO ₂ en el área de filtración de cerveza.....	37
Figura 34. bitácora de control de contenido de CO ₂ en el área de filtración de cerveza.....	38
Figura 35. Diagrama de flujo para envasar la cerveza.....	39
Figura 36. Actividades clave en la etapa de envasado de cerveza	40

Figura 37. Muestreo aleatorio de concentración de CO ₂ .	41
Figura 38. Muestreo aleatorio de volumen de % CO ₂ en llenadoras del área de envasado.	42
Figura 39. Diagrama SIPOC sobre el tratamiento de CO ₂ .	43
Figura 40 Factor de captura de CO ₂ por abajo del consumo.	45
Figura 41. Déficit en la recuperación de CO ₂ .	45
Figura 42. Punto de muestreo para determinar pureza de CO ₂ en fermentadores.	46
Figura 43. Trazabilidad de la pureza de CO ₂ donde los fermentadores se conectan a 18 horas.	46
Figura 44. Diagrama SIPOC sobre el tratamiento de agua para su carbonatación.	48
Figura 45. Registro de trazabilidad de contenido de CO ₂ en la carbonatación del agua.	49
Figura 46. tendencia sobre el factor de consumo de CO ₂ en la carbonatación del agua.	50
Figura 47. Diagrama SIPOC sobre la carbonatación en el proceso de filtración de cerveza.	51
Figura 48. Tendencia de facto de consumo de CO ₂ en la etapa de filtración de cerveza.	53
Figura 49. Diagrama SIPOC sobre la carbonatación en el proceso de envasado de cerveza.	54
Figura 50. Tendencia de facto de consumo de CO ₂ en la etapa de filtración de cerveza.	55
Figura 51. Tendencia de facto de consumo de CO ₂ en la etapa de filtración de cerveza.	56
Figura 52. Factor de consumo de CO ₂ .	57
Figura 53. Cantidad de CO ₂ utilizado en la cervecería.	57
Figura 54. Diagrama de Ishikawa elaborado por el equipo de E&F.	58
Figura 55. Análisis de causa raíz para analizar el alto consumo de CO ₂ .	59
Figura 56. Análisis de 5W, alto consumo de CO ₂ en el agua carbonatada.	59
Figura 57. Diagrama de Ishikawa elaborado por el equipo de Cuartos Fríos.	60
Figura 58. Análisis de 5W analizar el alto consumo de CO ₂ en el envasado de cerveza.	61
Figura 59. Análisis de 5W analizar concentración alta de CO ₂ en la cerveza que se envía al área de embotellado.	62
Figura 60. Gráfico de control, trazabilidad de pureza de CO ₂ en el área de fermentación Fase I.	65
Figura 61. Gráfico de control, trazabilidad de pureza de CO ₂ en el área de fermentación Fase II.	65
Figura 62. Gráfico de control, trazabilidad de pureza de CO ₂ en el área de fermentación Fase III.	65
Figura 63. Conexión de línea igualadora del tanque de CO ₂ hacia deareador de sistemas de carbonatación de agua.	68
Figura 64. Factor de consumo de CO ₂ en la carbonatación de agua.	70
Figura 65. Control de inyección de CO ₂ para la filtración de cerveza.	71
Figura 66. Bitácora de control de contenido de CO ₂ para la filtración de cerveza.	72
Figura 67. Factor de consumo de CO ₂ para la filtración de cerveza.	73
Figura 68. Programa de gestión de pruebas de estanqueidad para el área de envasado de cerveza.	74
Figura 69. Factor de consumo de CO ₂ para envasar cerveza.	75
Figura 70. Seguimiento oportuno para controlar micro fugas de CO ₂ en fermentadores.	76
Figura 71. Seguimiento oportuno para controlar micro fugas de CO ₂ el área de filtración de cerveza.	77

Figura 72. Seguimiento oportuno para controlar micro fugas de CO ₂ en el área llenadora de cerveza.....	78
Figura 73. Venta de excedente de CO ₂	81
Figura 74. Tendencia positiva para reutilización de CO ₂	81
Figura 75. Factor de CO ₂ (comprado-vendido/cerveza envasada).	82
Figura 76. Tendencia de factor de desempeño de Recuperación y consumo de CO ₂	82

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Estrategia de mejora en la utilización de CO ₂	14
Tabla 2. Significancia sobre niveles de defectos:.....	17
Tabla 3. Herramientas de calidad.....	20
Tabla 4. Despliegue de equipo disponible en para dimensionar la capacidad instalada.	21
Tabla 5. Plantas convencionales vs tipo stripper.	25
Tabla 6. Bitácora de captura planeada vs recuperado actual de CO ₂	44
Tabla 7. Muestreo de pureza de CO ₂ en el área de fermentación.....	46
Tabla 8. Equipo instalado de captación CO ₂	47
Tabla 9. Registro de factor de consumo de CO ₂ en el área de carbonatación de agua.....	50
Tabla 10. Registro de contenido de CO ₂ en la etapa de filtración de cerveza.....	52
Tabla 11. Registro de factor de consumo de CO ₂ en el área de filtración de cerveza.....	53
Tabla 12. Registro de factor de consumo de CO ₂ en el área de envasado de cerveza.....	56
Tabla 13. Bitácora de control de recuperación de CO ₂ después de implementar la mejora.	66
Tabla 14. Bitácora de control de conexión de fermentadores hacia recuperación.	67
Tabla 15. Disponibilidad de equipo de recuperación.	67
Tabla 16. Bitácora de control de contenido de CO ₂ la carbonatación de agua.	69
Tabla 17. Factor de consumo de CO ₂ para carbonatación de agua.	69
Tabla 18. Factor de consumo de CO ₂ para la filtración de cerveza.	72
Tabla 19. Factor de consumo de CO ₂ para el envasado de cerveza.	74
Tabla 20. Plan de acción para controlar las pruebas de estanqueidad en el envasado de cerveza.	78
Tabla 21. comparación de cantidad de CO ₂ entre hectolitros de cerveza envasada. (kg/hl).	79
Tabla 22. Cantidad de CO ₂ entre hectolitros de cerveza envasada. (kg/hl) anual	79

1. INTRODUCCIÓN

1.1.1 LA IMPORTANCIA DEL CO₂ EN LA ELABORACIÓN DE CERVEZA

En un entorno industrial cada vez más competitivo y exigente, la reingeniería de los procesos se ha consolidado como un pilar fundamental para el desarrollo y sostenibilidad de las industrias. Este campo tiene como objetivo principal maximizar la eficiencia operativa, reducir costos, minimizar desperdicios de los procesos productivos y elevar la calidad del producto. En la industria manufacturera, donde los márgenes de error y desperdicio impactan directamente en la rentabilidad, la implementación de estrategias de innovación es crucial para garantizar la competitividad a largo plazo.

La optimización de procesos industriales se apoya en una combinación de enfoques que van desde técnicas de análisis estadístico, simulación, hasta metodologías avanzadas de gestión sobre la mejora continua acompañado de tecnologías emergentes y automatizadas. Estas herramientas permiten rediseñar y mejorar flujos de trabajo, reducir tiempos de ciclo, aprovechando al máximo el uso de recursos y responder con agilidad las necesidades del mercado.

Todas las industrias generan datos y el sector de la manufactura no es la excepción, con la analítica avanzada se busca ser más eficiente en toda la cadena de valor de cada proceso a través de diversas metodologías de calidad que ofrecen soluciones, se realizan pronósticos y estudios para mejorar la confiabilidad de las máquinas con el fin de aumentar su productividad y buscar modelos predictivos más eficientes, así como identificar los errores anticipadamente (Cantú, E.2021).

El estudio de caso que nos ocupa se enfoca en la reutilización del dióxido de carbono (CO₂) que es un compuesto químico formado por un átomo de carbono y dos átomos de oxígeno. Es uno de los gases más importantes en la atmósfera y juega un papel importante en varios procesos naturales del planeta tierra.

El CO₂ es parte integral del ciclo del carbono, un proceso que involucra la circulación de carbono a través de la atmósfera. Sus principales procesos en este ciclo incluyen la fotosíntesis, la respiración, la descomposición, la combustión y la sedimentación. La fotosíntesis, realizada por las plantas y algunos microorganismos, utiliza CO₂ y la luz solar para producir carbohidratos y oxígeno, mientras que la respiración y la combustión liberan CO₂ nuevamente hacia la atmósfera.

El CO₂ es un gas de efecto invernadero, tiene la capacidad de atrapar el calor en la atmósfera a medida que las actividades humanas se van ejecutando, como la quema de combustibles fósiles (petróleo, carbón y gas natural), a medida que se liberan grandes cantidades de CO₂, la concentración de este gas en la atmósfera aumenta. Este incremento en la concentración de CO₂ ha llevado a un aumento en la retención de calor en la Tierra, impactando al calentamiento global y al cambio climático.

Algunas aplicaciones que tiene el CO₂ en la economía se describen a continuación:

- Procesamiento de materiales y productos químicos: El CO₂ se utiliza como agente de enfriamiento y refrigeración en procesos industriales, como la producción de plásticos, la soldadura y el corte de metales. Además, en ciertas condiciones de presión y temperatura, el CO₂ actuar como un solvente supercrítico en la extracción de compuestos químicos y en la producción de productos farmacéuticos (Vega, L. F. 2010).
- Agricultura y horticultura: El CO₂ se utiliza en invernaderos controlados para estimular el crecimiento de las plantas a través de un proceso llamado enriquecimiento de CO₂. Al aumentar la concentración de CO₂ en el aire, las plantas pueden realizar la fotosíntesis de manera más eficiente, lo que resulta en un crecimiento más rápido y una mayor producción de cultivos. (INEGYCEI, 2018).
- Extracción y producción de petróleo: El CO₂ se utiliza en la recuperación mejorada de petróleo, un proceso en el que el CO₂ se inyecta en yacimientos de petróleo agotados para mejorar la extracción del petróleo restante al aumentar la presión y reducir la viscosidad del petróleo. También se emplea en la fracturación ácida de rocas para aumentar la permeabilidad en la extracción de gas y petróleo. (Vega, L. F. 2010).
- Industria de alimentos y bebidas: El CO₂ se utiliza ampliamente en la industria de alimentos y bebidas para la carbonatación de bebidas gaseosas, como refrescos y cervezas. También se utiliza en la refrigeración y el congelamiento de alimentos, ya que puede transformarse en hielo seco para mantener productos a bajas temperaturas durante el transporte y el almacenamiento. (Cantú, E. 2021).

La disminución de las emisiones de dióxido de carbono ha sido uno de los principales retos en la actualidad para contrarrestar el impacto de los gases de efecto invernadero producidos en la combustión de combustibles fósiles en procesos industriales y de generación de energía.

Desde el año 1750 la concentración de CO₂ en la atmósfera ha aumentado en más de 100 ppm, llegando a situarse en la actualidad en torno a los 400 ppm. La captura y almacenamiento o utilización de carbono es considerada, como una de las tecnologías más prometedoras para reducir las emisiones atmosféricas de carbono. (Guerra, J.J& Lacy, R. 2013).

Entre todas las tecnologías existentes para la captura de CO₂, este estudio se centra en la recuperación del dióxido de carbono generado durante la fermentación. La corriente gaseosa emitida por los tanques fermentadores presenta una composición variable: la concentración de CO₂ inicia en niveles bajos menor a 50% y aumenta progresivamente, El CO₂ junto con la presencia de gases secundarios (como etanol, vapor de agua, etc.) condicionan la eficiencia de captura por lo que el análisis de este proyecto se enfoca en evaluar la adaptabilidad de las fluctuaciones de pureza y caudal típicas que implica el proceso industrial cervecero.

1.1.2 RELEVANCIA DEL CO₂ EN LA INDUSTRIA CERVECERA

El dióxido de carbono (CO₂) desempeña un papel fundamental en la industria cervecera, siendo un componente esencial en varios aspectos del proceso de producción. Desde la carbonatación hasta la conservación de la cerveza, el CO₂ de alta pureza es de suma importancia para garantizar la calidad y consistencia del producto final (Cantú, E. 2021).

En primer lugar, el CO₂ se utiliza para carbonatar la cerveza, dando un toque característico de efervescencia, este proceso afecta directamente al sabor, aroma y sensación en boca al momento de beber la cerveza, por lo que controlar cuidadosamente la cantidad de CO₂ es esencial para obtener el perfil de carbonatación deseado (I.S. Hornsey 2000). Durante la fermentación, la levadura produce CO₂ como subproducto, lo que contribuye a la carbonatación natural de la cerveza concentrada. Sin embargo, se añade CO₂ adicional para alcanzar el nivel de carbonatación deseado, inyectando directamente a los tanques de agua carbonatada que se usa para diluir la cerveza concentrada para que después sea envasada.

Por último, el CO₂ se utiliza durante el embotellado o enlatado de la cerveza para purgar los recipientes, esto ayuda a prevenir la oxidación de la cerveza, manteniendo su frescura y calidad durante un período más largo.

En resumen, el dióxido de carbono desempeña un papel crucial en múltiples etapas del proceso de producción de cerveza, su control cuidadoso es esencial para garantizar la calidad, consistencia y experiencia del producto final, a continuación, explicaré los beneficios que aporta el CO₂ en el giro cervecero con respecto a la calidad del producto final como lo muestra la Figura 2.



Figura 1. Aspectos importantes y aplicaciones del CO₂.

Fuente: Elaboración propia.

En un contexto de emisiones constante de CO₂ durante la fermentación en la producción de cerveza, una alternativa interesante es la captura, purificación y almacenamiento de CO₂ para hacer rentable se plantea optimizar estos procesos.

Con el objeto de conocer en el proceso de fermentación, el tiempo óptimo de apertura de válvulas para el inicio de la recolección de CO₂, se diseñaron y aplicaron pruebas con distintos escenarios considerando como variables, como tipo de cerveza, contenido de azúcares - alcohol y por su puesto la levadura.

El presente trabajo se encuentra estructurado por capítulos, en los cuales se abordan todo lo referente a la tecnología de captura y almacenamiento de CO₂ y los parámetros de calidad del proceso.

- El primer capítulo denominado Definir: habla de la problemática que ocasiona el bajo aprovechamiento de la reutilización de CO₂, así como el uso y aplicación de este en las diferentes áreas productivas de la cervecería.
- El capítulo dos denominado Medir: hace referencia de manera breve en lo que consiste el método actual de captura y tratamiento para la purificación CO₂, así como medir la cantidad inyección de CO₂ para carbonatar las diferentes etapas del proceso cervecero.
- El tercer capítulo denominado Analizar: aborda todo lo referente a la trazabilidad de comportamiento del volumen de CO₂ y también entender las áreas de oportunidad en cuanto al uso de CO₂ para carbonatar la cerveza, en dicho capítulo se realiza un análisis a través de dos parámetros: riesgo y rentabilidad.
- El capítulo cuarto denominado Mejorar: mediante una serie de pruebas que se analizan 3 escenarios para mejorar la eficiencia en la recuperación de CO₂; definiendo la estrategia para reducir el uso del CO₂ y por otro lado mejorar la tasa de recuperación.
- Dentro del capítulo quinto denominado Controlar: se implementa medidas en cada uno de los bloques del proceso con la finalidad de mantener las mejoras prácticas en cuanto a la recuperación y uso de CO₂.
- El último capítulo aborda tanto las conclusiones y recomendaciones obtenidas a través de la realización de dicho trabajo.

1.1.3 ESTUDIO DE CASO

El estudio de caso se basa en una planta cervecera fundada en los años 80's, la cual produce cerca de 10,000 hectolitros de cerveza al año en la Ciudad de México. Sus equipos de producción son mixtos combinando sistemas convencionales y de alta tecnología para la captura de CO₂, bajo este contexto, en el presente trabajo se propone mejorar la tasa de captura y reutilización del CO₂ en todo el proceso de producción de cerveza.

El estudio de caso cuantifica la recuperación de CO₂ procedente de la fermentación cervecera, donde los tanques operan en condiciones estándar de 0.1 kg/cm² y 16°C ±0.5°C. El perfil de concentración muestra una evolución característica: desde 20 a 30% de CO₂ en fase inicial hasta alcanzar 99% de pureza en fase final, con una tasa de incremento de 1.2 a 1.8% por hora durante la fermentación activa.

Por otra parte, el estudio de analiza la utilización de CO₂ en las áreas críticas para la elaboración de cerveza, tales como la sección de carbonatación de agua para diluir cerveza, filtración de cerveza diluida y envasado de la cerveza, a continuación, se despliega la línea operativa de la cervecera.

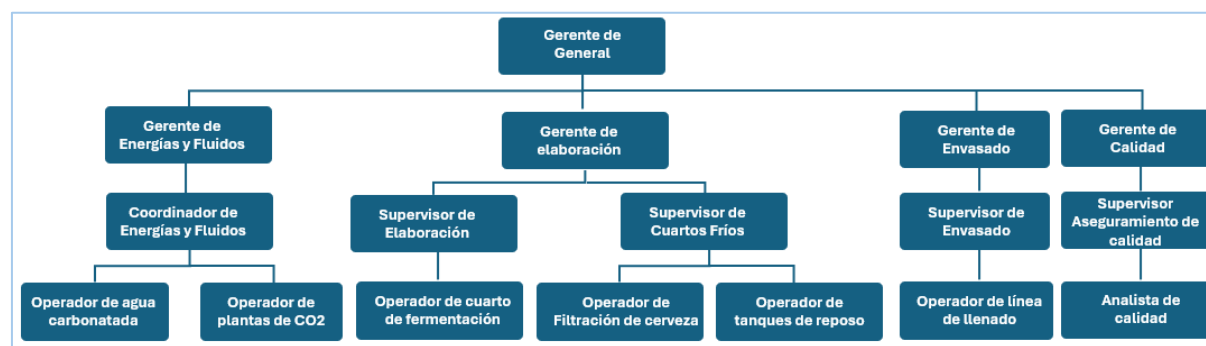


Figura 2. Organigrama de equipo de trabajo de la cervecería.

Fuente: Elaboración propia.

Como coordinador del departamento de Energía y Fluidos (E&F), tengo la responsabilidad de asegurar la gestión eficiente de los recursos energéticos para la operación cervecera, entre ellos el dióxido de carbono (CO₂). Dado que este insumo es administrado por nuestra área, tomé la iniciativa de liderar un proyecto de mejora enfocado en maximizar la recuperación de CO₂ y el uso de este en el proceso cervecero como se muestra en la Figura 1.

Este esfuerzo implicó no solo validar y ajustar nuestros propios procesos, sino también analizar procesos de otras áreas clave como filtración de cerveza y envasado, donde el uso de CO₂ tiene un impacto directo en la demanda sobre este insumo vital.

1.1.4 HIPOTESIS

“Si se implementan estrategias para mejorar reutilización del CO₂ aprovechando la recuperación al máximo generado durante el proceso fermentación para la elaboración de cerveza, entonces es posible alcanzar la autosuficiencia en el uso de CO₂ y reducir la necesidad de adquirirlo externamente”.

Esta hipótesis establece una relación sobre la causa y es medible en la cual se puede desglosar en:

Variable Independiente (Causa):

- La implementación de un sistema de gestión para aprovechar la sustentabilidad del CO₂.

Variables Dependientes (Efectos Medibles):

- Indicador de autosuficiencia: $(\text{Kg de CO}_2 \text{ reutilizado} / \text{Kg total consumido}) \times 100$.
- Indicador Económico surplus: Reducción de los costos asociados a la compra de CO₂. $(\text{Kg de CO}_2 \text{ comprado} - \text{vendido}) / 100$.

¿Cuáles son los elementos que se deben llevar a cabo para mejorar la reutilización de CO₂?

La reutilización eficiente del CO₂ en el proceso cervecero no solo representa una oportunidad para reducir costos y dependencia de proveedores externos, sino que también responde a la necesidad de implementar prácticas de modelo de gestión de mejora continua. Para lograr una mejora significativa en la reutilización de este insumo, es indispensable implementar una serie de elementos técnicos, operativos y de gestión que aseguren aprovechamiento de este insumo valiosos que se desglosan a continuación.

- Captación eficiente sin comprometer la calidad del producto.
- Reutilización Eficiente en el Proceso (Autosuficiencia).
- Monitoreo y control de volumen de CO₂ en las diferentes etapas del proceso cervecero.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1. Objetivo General

Aprovechamiento sustentable del proceso de producción de cerveza con respecto al uso del CO₂ cumpliendo las características de calidad.

1.2.2. Objetivos Específicos

Mejorar la recuperación de CO₂ en el proceso de fermentación de la cerveza:

- Diagnosticar la varianza de la pureza de CO₂ en la curva de fermentación de la cerveza.
- Identificar frecuencia apropiada para conexión oportuna de recuperación de CO₂.
- Estandarizar procedimiento de control de pureza en tanques fermentadores.
- Maximizar la captura de CO₂ para mejorar la eficiencia de la tasa de recuperación.

Reducción del requerimiento de CO₂ en el proceso de elaboración de cerveza:

- Diagnosticar las etapas del proceso cervecero con mayor consumo de CO₂.
- Identificar los puntos críticos donde se genera un uso ineficiente de CO₂ y proponer soluciones para reducir su utilización.
- Estandarizar procedimientos para controlar el volumen y uso CO₂ en proceso cervecero.

Alcance de los objetivos: Diseño e implementación de la mejora en la utilización de CO₂ en el proceso cervecero al cierre del año 2023.

Tabla 1. Estrategia de mejora en la utilización de CO₂.

	Recuperación CO ₂	Consumo de CO ₂
 Descripción del proyecto	Mejorar la capacidad de recuperación de CO ₂ sin comprometer la calidad del producto.	Balancear el consumo de CO ₂ sin afectar atributos de calidad del producto.
 Impacto al negocio	Aumentar el volumen de CO ₂ de recuperado a 20% para 2023.	Reducir el 15% consumo de CO ₂ de en las áreas productivas para el 2do semestre 2023.
 Problema	La conexión a destiempo de los tanques fermentadores genera volumen de CO ₂ que no se recupera, no se aprovecha la capacidad instalada.	La mala gestión operativa del CO ₂ para carbonatar la cerveza genera desperdicios y provoca la compra externa de este insumo.
 Resultados esperados para la cervecería	Reducir o eliminar la compra de CO ₂ y optimizar el volumen de recuperación actual.	Optimizar la aplicación de CO ₂ a través de buenas prácticas de operación.
 Beneficios esperados para el grupo	Venta de CO ₂ como subproducto a cerveceras del grupo y también al mercado externo.	Rapidez en la atención para control y cuidado de este insumo, hay ocasiones que hay escasez de CO ₂ en el mercado externo.
2023	Indicadores estratégicos - Factor de CO₂ utilizado de 3.12 Kg/HL de cerveza envasada para 2023. - CO₂ surplus 0.05 Kg/HL para 2023.	Acciones climáticas: Sustentabilidad - Reducir 15% las emisiones de carbono a lo largo de la cadena de valor para 2026. - Utilizar CO₂ como energía alterna para la generación de vapor para 2025.

Nota: Fuente, elaboración propia.

1.3 JUSTIFICACIÓN DE LA SELECCIÓN DE LA METODOLOGÍA LEAN SIX SIGMA

La metodología Lean Six Sigma fue seleccionada como enfoque principal para mejorar la tasa de recuperación de CO₂ en tanques fermentadores debido a su capacidad comprobada para reducir variabilidad de la concentración de gases secundarios y aprovechar al máximo la captación del mismo, eliminar desperdicios y mejorar la eficiencia del proceso cervecero con respecto a la utilización de este insumo, donde la calidad del producto y la eficiencia son importante.

El sector cervecero, representa una oportunidad de ahorro energético y económico, además de un compromiso con la sostenibilidad ambiental ya que la recuperación eficiente del dióxido de carbono puede verse comprometida por presencias residuales de oxígeno (O₂) en los fermentadores, lo cual afecta tanto la calidad del gas recuperado como el rendimiento del proceso de recuperación.

La implementación de un analizador de gases que mide en partes por millón (ppm) la concentración de O₂ permite cuantificar con precisión estas desviaciones, proporcionando datos clave para el análisis del proceso. Bajo este marco, Lean Six Sigma ofrece una estructura sólida (mediante su ciclo DMAIC: Definir, Medir, Analizar, Mejorar y Controlar) para:

Identificar y eliminar las fuentes de entrada de O₂ que afectan la recuperación de CO₂.

- Establecer controles estadísticos sobre las variables críticas del proceso.
- Estandarizar procedimientos operativos, reduciendo errores humanos o técnicos.
- Aumentar la confiabilidad del sistema de recuperación de CO₂, mejorando la calidad del gas almacenado.

De esta manera, se despliega la estrategia de ciclo de gestión para lograr el objetivo como se muestra en la Figura 3:

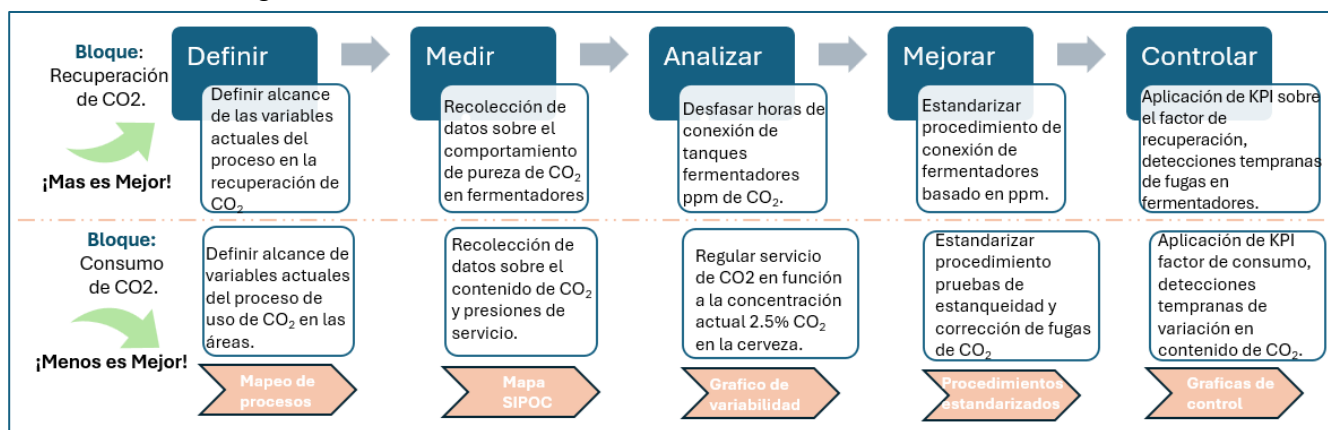


Figura 3. Estrategia de ampliación de DMAIC.

Nota: Fuente, elaboración propia.

Asimismo, el enfoque combinado de Lean (eliminación de desperdicio) y Six Sigma (reducción de variabilidad) es particularmente adecuado para la estandarización de procesos en los que se requiere apego a la rutina, medición precisa y mejora continua, como en el caso del monitoreo y control de contenido de CO₂ en la cerveza sin comprometer la calidad.

1.4 LEAN SIX SIGMA Y CALIDAD EN EL SERVICIO

La metodología Six Sigma se fundamenta en el análisis de datos para reducir las variaciones en todos los procesos de una organización, desarrollado por Motorola en 1987, el objetivo es reducir y eliminar los defectos. El término Six Sigma proviene de la relación que existe entre la variación de un proceso y los requerimientos del cliente relacionados con dicho proceso (Eduardo Navarro, 2017).

Todo proceso posee variables de entrada controlables de acuerdo con la característica de calidad deseada y variables no controlables que de acuerdo con la Figura 4, es posible definir sigma (σ , desviación estándar) como la distancia que existe entre el valor del centro (el promedio, $\bar{X}$) y el punto de inflexión.

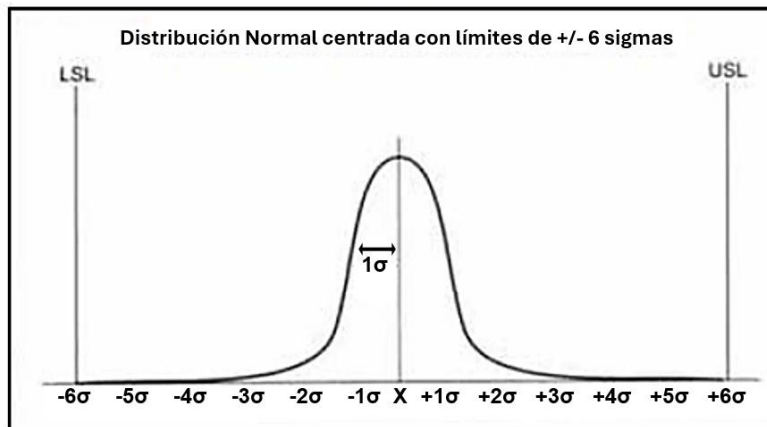


Figura 4. Comportamiento de una variable y escala de sigmas.

Nota: Tomado de *Metodología e implementación de Six Sigma*, por Eduardo Navarro, 2017, investigación pensamiento crítico.

En una distribución normal, un proceso 3 Sigma, la variabilidad del proceso permite que aproximadamente el 93.32% de los productos o servicios producidos estén dentro de las especificaciones, esto significa que hay 2.7 defectos por cada mil oportunidades.

En la Figura 5, puede verse que los valores de sigma representan la manera en la que el proceso está cumpliendo las especificaciones del cliente, por lo que un defecto queda definido como cualquier valor fuera de estas especificaciones.

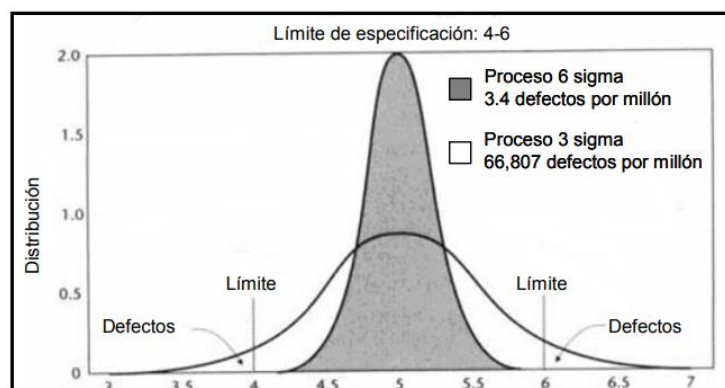


Figura 5. Alcance sobre límites y tolerancia en una variable.

Nota: Tomado de *Metodología e implementación de Six Sigma*, por Eduardo Navarro, 2017, investigación pensamiento crítico.

Cuando en un proceso 6 Sigma, la variabilidad del proceso se reduce aún más, permitiendo que aproximadamente el 99,99966% de los productos o servicios producidos estén dentro de las especificaciones.

Seis Sigma representa un nivel extremadamente alto de calidad y eficiencia en el proceso, con una reducción significativa en la cantidad de defectos, basado en datos para lograr mejoras significativas y sostenibles.

Al reducir la variabilidad y los defectos, Seis Sigma ayuda a las organizaciones a mejorar la satisfacción del cliente, reducir costos y aumentar la eficiencia operativa, estos niveles de defectos se ilustran en la tabla 2.

Tabla 2. Significancia sobre niveles de defectos:

Nivel Sigma	Defectos por millón de oportunidades	Porcentaje (sin defectos)
6	3.4	99.9997%
5	233	99.977%
4	6,210	99.379%
3	66,807	93.32%
2	308,537	69.20%
1	690,000	31%

Nota: Tomado de *Metodología e implementación de Six Sigma*, por Eduardo Navarro, 2017, investigación pensamiento crítico.

Por lo tanto, tener un proceso “Six Sigma” significa producir únicamente 3.4 defectos en un millón de oportunidades con una variación natural permitida (debido a los factores no controlables) de 1.5σ alrededor de la media, como se muestra en la Figura 6.

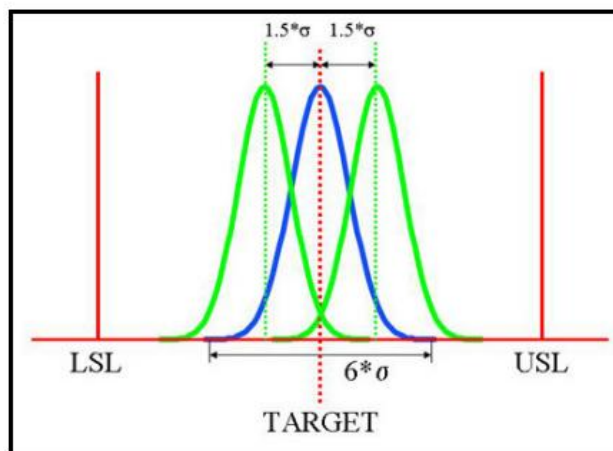


Figura 6. Límites y tolerancia de una media en una variable.

Nota: Tomado de *Metodología e implementación de Six Sigma*, por Eduardo Navarro, 2017, investigación pensamiento crítico.

En general, Six Sigma es un sistema de administración de mejora como se muestra en la Figura 7 , busca la practicidad sistémica para:

- Obtener mejoras: Los proyectos están enfocados en obtener mejoras desde un 30% hasta un 50% sobre el métrico crítico seleccionado a corto plazo.
- Tener un enfoque al cliente: El producto está basado en lo que desea el cliente y finalmente, la calidad de un producto o servicio es medido a partir de la satisfacción del cliente.
- Obtener resultados financieros: Las utilidades de los ahorros generados mediante los proyectos pueden palpase a corto plazo, cada proyecto seleccionado tiene un impacto financiero importante.
- Decidir en hechos y datos: La metodología Six Sigma está basada 100% en los datos: no hay decisiones por instinto, las herramientas estadísticas emplean un papel muy importante al verificar cada supuesto y validar cada decisión.

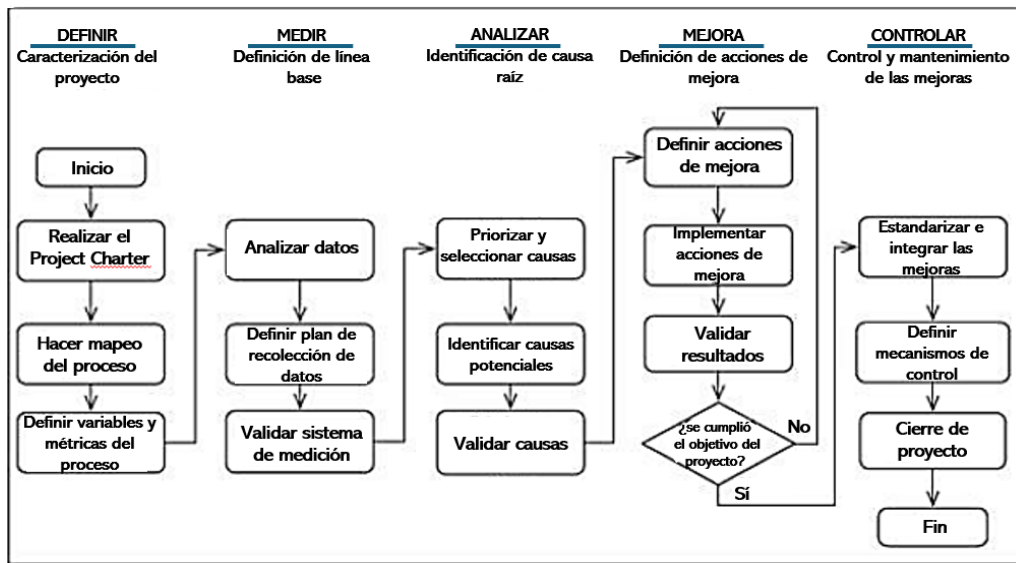


Figura 7. Diagrama de flujo para atender un proyecto de mejora.

Nota: Tomado de *Metodología e implementación de Six Sigma*, por Eduardo Navarro, 2017, investigación pensamiento crítico.

METODOLOGÍA DMAIC

Una de las ideas centrales de “Six Sigma” es analizar los problemas con proyectos definidos empleando elementos entrenados y especializados en la solución de problemas y análisis estadístico de datos. En general, “Six Sigma” busca solucionar un problema práctico con una solución práctica, utilizando herramientas estadísticas. Esta descripción se muestra gráficamente en la Figura 8:

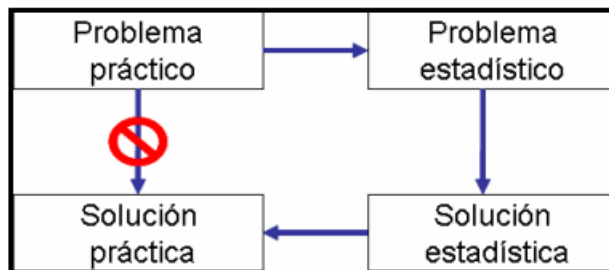


Figura 8. Diagrama de flujo con análisis sistémico.

Nota: Tomado de *Metodología e implementación de Six Sigma*, por Eduardo Navarro, 2017, investigación pensamiento crítico.

Este enfoque se encuentra respaldado por una metodología de mejora denominada con el acrónimo DMAIC, tal como lo describe Diana Proaño, V. G.S. (2017). Esta metodología es un proceso estándar para la solución de problemas que consta de cinco fases: definir, medir, analizar, mejorar y controlar, la Figura 9 muestra estas fases:

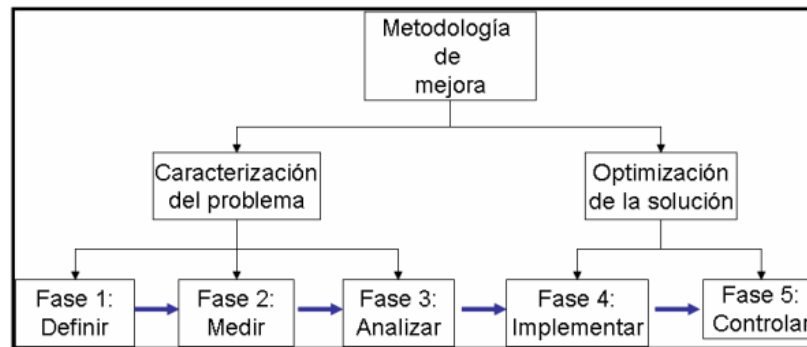


Figura 9. Despliegue de fases DMAIC para caso de mejora.

Nota: Tomado de *Metodología e implementación de Six Sigma*, por Eduardo Navarro, 2017, investigación pensamiento crítico.

Todos los proyectos Six Sigma deberán pasar por cada una de las cinco fases, aunque el contenido de cada una pueda variar debido a la naturaleza propia del proyecto, así como las herramientas de gestión para ejecutar cada paso como se ven algunos en ejemplos en la tabla 3.

A continuación, se muestra la descripción de cada fase:

- **Definir:** En esta fase se define claramente el problema y el objetivo a alcanzar, así como el beneficio financiero estimado. Asimismo, se define el proceso objetivo y métrico primario que se desea incrementar o reducir, también se define el alcance del proyecto y la fecha de inicio y término del mismo.
- **Medir:** La recolección de datos relevantes es el objetivo de esta fase. En esta fase también se realiza el diagnóstico del estado actual del proceso mediante las herramientas adecuadas.
- **Analizar:** Se analizan los datos recolectados y el estado actual del proceso para identificar las causas que dan surgimiento al problema con el uso de las herramientas estadísticas y analíticas necesarias.
- **Mejorar:** En esta fase se proponen diferentes soluciones al identificar las variables de importancia y los niveles adecuados a los que deberán funcionar (utilizando herramientas estadísticas), posteriormente se selecciona la mejor solución, de acuerdo con el análisis previo, y se implementa.
- **Controlar:** Una vez implementada la solución se generarán planes y medidas de control que sirvan para dar seguimiento, controlar y mantener la mejora alcanzada.

Tabla 3. Herramientas de calidad.

Etapas Sigma	Herramientas de calidad
Definir	• Diagrama de Pareto • La voz del cliente (VOC) • Matriz de variables críticas • Mapa de proceso SIPOC • Diagrama de Flujo de proceso
Medir	• Diagrama de Pareto • Diagrama de Ishikawa • Matriz causa-efecto • Análisis de modo y efecto de falla (AMEF)
Analiza	• Histogramas • Medidas de dispersión o variabilidad • Métrica de desempeño proceso
Mejora	• Técnicas analíticas • Técnicas de comparación financiera • Documentación y registro
Controlar	• Planes de control • Gráficas de control

Nota: Tomado de *Metodología e implementación de Six Sigma*, por Eduardo Navarro, 2017, investigación pensamiento crítico.

CONCLUSIÓN DE LA METODOLOGÍA LEAN SIX SIGMA

La metodología “*Lean Six Sigma*” nos ayudará a mejorar los procesos y la simplificación de estos, sin afectar la calidad del producto, misma que nos brinda un soporte estructurado para correr la propuesta de mejora en la reutilización de CO₂ para la industria cervecera.

2. FASE: DEFINIR

DIAGNÓSTICO DE LOS PROCESOS DE LA CERVECERIA EN LA CIUDAD DE MÉXICO

La base para realizar el análisis de los procesos de la cervecería fue a través de la metodología Lean Six Sigma, en base a ello lograremos entender el proceso que implica la recuperación y el uso de CO₂ en las áreas productivas, apoyándonos de la primera fase llamada Definir de la metodología DMAIC.

La cervecera cuenta con una capacidad instalada para producir anualmente 10,000 hectolitros de cerveza al año, dividida de la siguiente manera:

Tabla 4. Despliegue de equipo disponible en para dimensionar la capacidad instalada.

Departamento	Area	Equipo	Capacidad	Presentación
Elaboración	Cocimientos	6 Ollas	850 HL	Cilindricos
		6 Maceradores	450 HL	Cilindricos
	Fermentación	303 tanques	800 HL	Cilindricos
		12 Unitanques	11,000 HL	Cilindricos
	Filtración de cerveza	12 Filtros	600 HL	Cilindricos
		30 Tanques	800 HL	Cilindricos (reposo)
Envasado	Envasado	2 Linea	44 x min	Botella Retornable 940 ML
		2 Linea	30 x min	Botella Retornable 1200 ML
		4 Linea	48 x min	Botella Retornable 355 ML
		1 Linea	60 x min	bote 355 ML
		1 Linea	1x min	Baril Retornable 29 litros

Nota: Fuente, elaboración propia.

DIAGNÓSTICO GENERAL

El objetivo específico de este capítulo es conocer el impacto de la tasa de captación y la aplicación de CO₂, así como todas las etapas que comprenden la elaboración de cerveza, además de evaluar los tiempos de conexión de tanques fermentadores (cierre de la válvula de venteo hacia la atmósfera y apertura de la válvula de recuperación) esto permite que el flujo de CO₂ sea dirigido hacia el cabezal principal de captación de CO₂, donde se recolecta para su tratamiento de purificación; con la finalidad de encontrar las áreas de oportunidad y lograr el objetivo que es la aumentar la capacidad de recuperación de CO₂.

En la Figura 10 podemos notar el área de oportunidad sobre la recuperación CO₂, las barras de color naranja nos indica que tenemos un consumo muy por arriba de lo que se recupera; dándonos a entender que no somos autosuficientes para mantener la continuidad de la operación, por ello se opta por comprar pipas de CO₂, en la Figura 11 podemos ver la cantidad de CO₂ que se necesitó adquirir a través de proveedores externos, más adelante entraremos a detalle para conocer lo que implica.

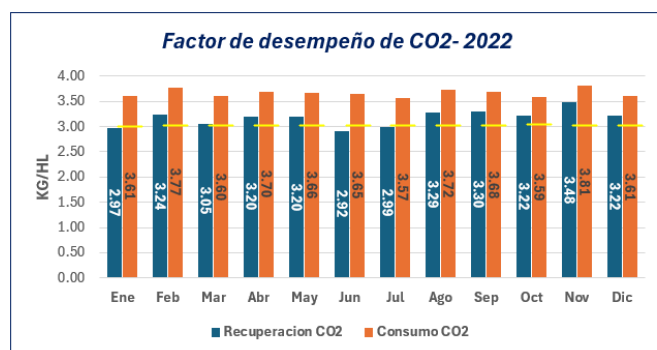


Figura 110. Tendencia sobre el uso del insumo en 2022.

Nota: Fuente, elaboración propia.

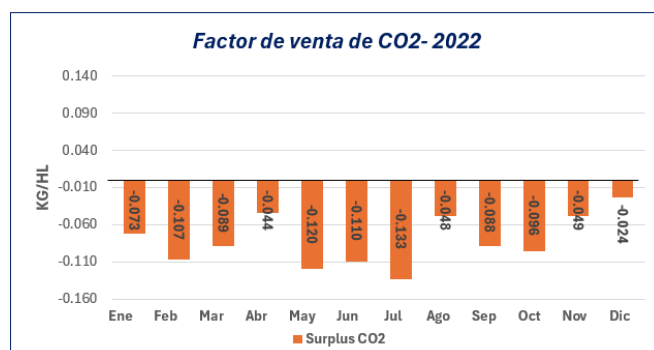


Figura 101. Compra de CO₂ en el periodo 2022.

Nota: Fuente, elaboración propia.

Con base a lo anterior, la Figura 11 explica que el consumo de CO₂ está por encima de la recuperación, la tendencia del factor de consumo de CO₂ es alto, comparando con otras operaciones la mejor práctica en cuanto al uso de CO₂ está por debajo de 3.0 kg/hl de cerveza envasada, por otra parte, con respecto a la recuperación está por debajo de lo esperado, otras operaciones logran estar arriba de 3.2 kg/hl para no depender de compras de CO₂.

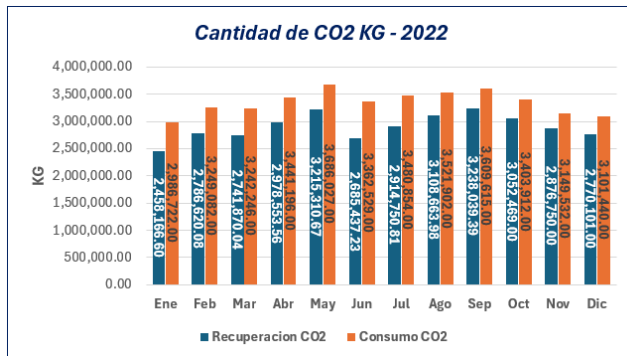


Figura 12. Tendencia del factor el uso de CO₂ en 2022, (Cantidad de CO₂ entre cerveza envasada).

Nota: Fuente, elaboración propia.

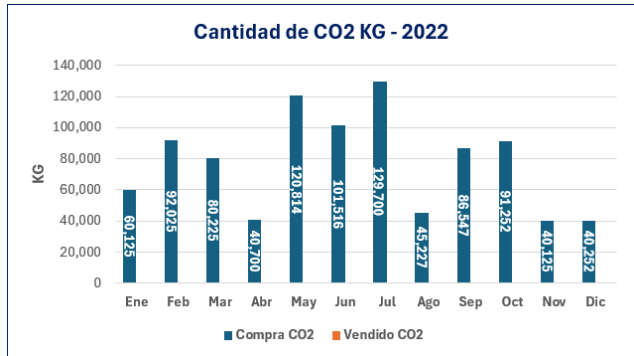


Figura 13. Factor de compra de CO₂ en el periodo 2022. (CO₂ comprado – CO₂ vendido entre cerveza envasada).

Nota: Fuente, elaboración propia.

La Figura 12 nos muestra un déficit negativo en el balance de la reutilización de CO₂, lo cual se traduce a un bajo desempeño en la recuperación de CO₂ y una demanda alta sobre el consumo de CO₂ provocando la compra de este insumo, el objetivo es llevarlo a cero compras de CO₂ con posibilidad de vender este subproducto como se muestra en la Figura 13.

Las áreas de oportunidad en la cervecería tales como, bajo aprovechamiento en la recuperación de CO₂ provoca un desequilibrio en el rendimiento del stock almacenado debido a consumos altos por el mal uso de CO₂ en las diferentes áreas productivas, esto ha causado un alto impacto en la productividad siendo ineficientes en el proceso cervecero, el riesgo de parar la operación es alto ya que se tiene el peligro de parar la producción de cerveza debido a la falta de este insumo vital.

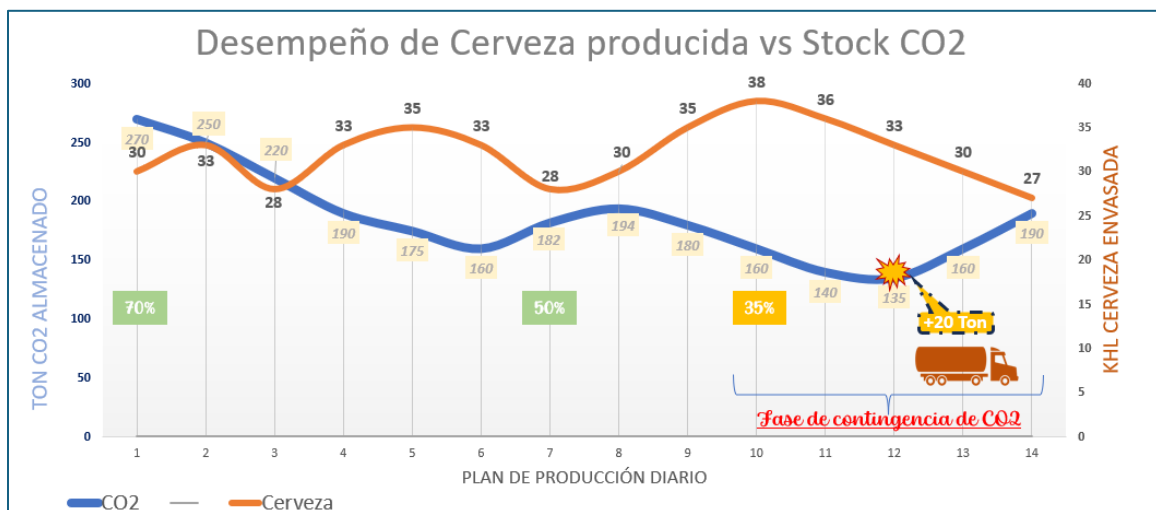


Figura 14. Activación de compra de CO₂ por contingencia de CO₂.

Nota: Fuente, elaboración propia.

En la Figura 14 explicamos el despliegue de plan de producción de cerveza envasada, por ejemplo el día 4 se prevé un volumen de 33,000 hectolitros, el consumo de CO₂ es alto provocando la caída de CO₂ almacenado representado en la línea azul, esto suele ocurrir cuando coincide la caída de recuperación de CO₂ según la curva de producción de CO₂ en tanques fermentadores, en ese momento se activa la fase denominada “contingencia de CO₂” pues el stock de almacenamiento comienza a decaer de manera significativa, al llegar a 35% de stock disponible se activa la compra de pipa de CO₂ a proveedores externos para mantener la continuidad del proceso.

ETAPAS PARA REALIZAR EL DIAGNÓSTICO DE LOS PROCESOS DE LA CERVECERIA EN LA CIUDAD DE MÉXICO

Para evaluar los procesos de la cervecería empezamos por conocer el flujo de todo el proceso de la elaboración de la cerveza, esto comprende desde la preparación de la cerveza hasta que se envasa, esta evaluación de la situación actual se dividió en tres etapas que a continuación se muestran:

1. Diagnóstico del Lay-Out de la cervecería y mapeo de proceso.
2. Diagnóstico del trabajo estandarizado de la cervecería que comprenden:
 - Equipos
 - Proceso de elaboración de la cerveza, fermentación y su aplicación.
 - Métodos y procedimientos.
 - Manejo de controles visuales.
3. Toma de tiempo de fermentación de la cerveza para determinar la apertura de las válvulas hacia los sistemas de recuperación y purificación de CO₂.
4. Análisis sobre el uso y aplicación de CO₂ en las áreas productivas.

2.1 CAPTACIÓN DE CO₂: LA FERMENTACIÓN Y LA RELEVANCIA EN LA RECUPERACIÓN DE CO₂.

2.1.1 DIAGNÓSTICO DEL LAYOUT DE LA FERMENTACIÓN

La fermentación de la cerveza es un proceso biológico en el cual los azúcares presentes en la malta (granos de cebada germinados y secos) se convierten en alcohol y dióxido de carbono mediante la reacción de la levadura, la Figura 15 resume los pasos clave del proceso:



Figura 15. Diagrama de flujo para la elaboración de la cerveza.

Nota: Fuente, elaboración propia.

- Molienda y Maceración: La malta se muele para exponer sus almidones, luego se mezcla con agua caliente en un proceso llamado maceración, donde las enzimas de la malta descomponen los almidones en azúcares fermentables (I.S. Hornsey 2000).
- Ebullición: El mosto resultante de la maceración se hierve y se le añade lúpulo, que contribuye al sabor y aroma de la cerveza; la ebullición también esteriliza el mosto y desactiva las enzimas.
- Enfriamiento y Fermentación: El mosto hervido se enfría rápidamente y se transfiere al fermentador. Se añade levadura, que consume los azúcares presentes en el mosto y produce alcohol y dióxido de carbono.
- Filtración y Clarificación: Después de la fermentación primaria, la cerveza se traslada a otro recipiente para la maduración. Aquí, los sabores se desarrollan y se filtra la cerveza eliminando sedimentos.
- Envasado: La cerveza se carbonata mediante la inyección de CO₂ haciendo un barrido para desplazar el oxígeno de la botella y se sella para preservar su frescura.

A continuación, en la Figura 16 se muestra un bosquejo de la representación del tren de recuperación de CO₂ de la cervecería, hacemos una breve descripción de los demás componentes para entender el flujo.

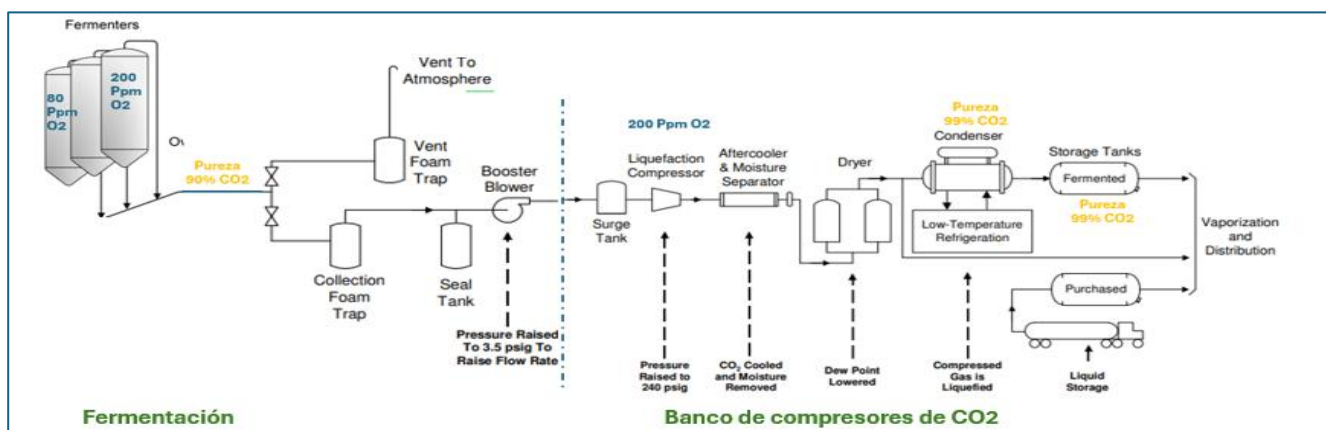


Figura 16. Diagrama de flujo para la captura, purificación y almacenamiento de CO₂.

Nota: Fuente, elaboración propia.

La recuperación de CO₂ de baja pureza y su posterior almacenamiento como CO₂ de alta pureza implica varias etapas, a continuación, presento un esquema general de estas etapas:

- Captura de fuente: La captura de CO₂ de baja pureza proveniente de los tanques fermentadores que desemboca al cabezal general donde se conectan las plantas convencionales y de alta tecnología.
- Separador de espuma: método para purgar excedente de espuma derivado de la fermentación de la cerveza, el objetivo es recuperar CO₂ en estado gaseoso únicamente.
- Lavadora de CO₂: El lavado de gas es para separar las impurezas solubles con agua, para hacerlo El gas de CO₂ ingresa por la parte inferior de la columna y la abandona

por la parte superior. Debido a la mayor área de contacto entre el agua que cae y el gas de CO₂ a contracorriente, se eliminan las impurezas por lavado.

- Compresión de CO₂: En esta etapa la presión de CO₂ se eleva a 18 bares. Esta presión es necesaria en el flujo descendente del condensador de CO₂ para condensar el CO₂ a una temperatura de -30 a -40°C y a la vez va a permitir una correcta deshidratación y licuefacción del gas, actualmente la cervecería cuenta con 4 plantas tipo convencional y 2 con tecnología “stripper” que a continuación explicare las etapas que la componen la planta de recuperación:

Tabla 5. Plantas convencionales vs tipo stripper.

Planta Convensional		Planta con "streapper"	
Marca	Mycom	Marca	TPI
Modelo	2TEV63-460/240	Modelo	2TEV63-460/240
Año de fabricación	1990	Año de fabricación	2007
Nº Serie	104203	Nº Serie	504203
Capacidad	500kg / hr	Capacidad	2000 kg / hr
Presión Max. Trabajo	20 bar / 290 psi	Presión Max. Trabajo	20 bar / 290 psi
Presión de Trabajo	18 bar / 261 psi	Presión de Trabajo	18 bar / 261 psi

	
Regeneración manual de filtros deorizador alta y baja presión con vapor	Regeneración de filtro deorizador automatica con aire caliente
Recuperación de CO2 a partir de 99.95% de pureza	Recuperación de CO2 a partir de 98% de pureza

Nota: Fuente, elaboración propia.

- Deorizado de CO₂ (purificador de CO₂): Este proceso tiene la finalidad de eliminar las impurezas (como compuestos orgánicos y azufrados) y vapor de agua (humedad). La entrada de CO₂ es dirigido hacia el filtro de carbón activado con el objetivó es remover las impurezas del CO₂ después el gas será secado con un desecador hasta el punto de rocío de - 40 °C a 17,5 Bar o menor de lo medido en la operación de presión y cualquier partícula de polvo cual es arrastrada será separada en el filtro.
- Licuefacción y destilación de CO₂: La expansión adiabática del CO₂ provoca una caída significativa de la temperatura, lo que lleva al CO₂ a alcanzar su punto de condensación y pasar del estado gaseoso al estado líquido, la recirculación de CO₂ con el refrigerante a través del proceso de condensación proviene de la evaporación del NH₃, lo que atribuye a una planta tipo convencional, a diferencia del tipo “stripper” esta cuenta con una etapa final llamada reciclado donde el CO₂ en estado líquido se calienta con una resistencia, el calor provoca la liberación del CO₂ en estado gaseoso y esta es llevada nuevamente al licuefactor dejando solamente CO₂ en estado líquido concentrado con alta pureza (99.99%), al cumplir esa condición se puede almacenar.
- Almacenamiento de CO₂ de alta pureza: El CO₂ en estado líquido es bombeado por diferencial de presión desde el licuefactor hasta el tanque receptor, constantemente se evalúa la capacidad del sitio de almacenamiento para retener el CO₂ de manera segura a largo plazo.

- Evaporación de CO_2 : El CO_2 en estado líquido proveniente del tanque de almacenamiento es evaporado a través de un intercambiador de calor, el CO_2 al entrar en contacto con el amoníaco en estado gaseoso comienza a evaporarse quedando listo para darse servicio de CO_2 a las áreas de carbonatación de agua, filtración de cerveza y envasado.
- Cumplimiento normativo: Cumplimiento de los requisitos regulatorios y normativos relacionados con la captura, purificación, y almacenamiento de CO_2 .

2.1.2 DIAGNÓSTICO DEL PROCESO DE FERMENTACIÓN

Como podemos observar en la Figura 17 Una vez hervido el mosto para esterilizarlo, se enfría, después se almacenan en tanques donde se añaden levadura al mosto para iniciar la fermentación.

La levadura consume los azúcares presentes en el mosto y produce alcohol y se libera el dióxido de carbono y otros gases.

Durante esta etapa, la levadura está en su máximo nivel de actividad convirtiendo los azúcares en alcoholes ahí cuando se produce una efervescencia significativa debido a la liberación de CO_2 , óxidos de nitrógeno (NO_x), óxido de azufre (SO_x) y oxígeno, la concentración de alcohol en el mosto aumenta, y la producción de CO_2 disminuye gradualmente.



Figura 17. Imagen de un tanque fermentador.
Nota: Fuente, elaboración propia.

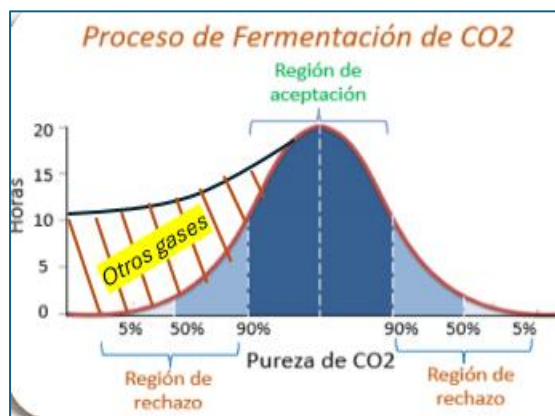


Figura 18. Comportamiento de pureza CO_2 .
Nota: Fuente, elaboración propia.

El proceso de fermentación se basa en la rampa de la campana de gauss como se muestra en la Figura 18, en promedio cerca de 21,000 hectolitros de mosto concentrado a libera múltiples gases desde las primeras horas que ocurre la fermentación, el intervalo de recuperación de CO_2 va de 5 a 7 días dependiendo la presentación/marca de la cerveza, tomando la consideración del rango de aceptación a partir de que alcance el 90% pureza, podemos decir que se tiene un estimado de 60 a 105 toneladas de recuperación por día.

El flujo que tiene recuperación tiene un área de oportunidad, la cual analizaremos en la fase Mejorar, realizando una propuesta para solucionar este tema.

A continuación, en la Figura 19 se muestra el mapa de proceso del área de fermentación, con la finalidad de identificar actividades relevantes que desempeña el operador en su proceso, se analiza las áreas de oportunidad y se planifica la estrategia para mejorar la recuperación a corto plazo, ya que es necesario para hacer el análisis a fondo.

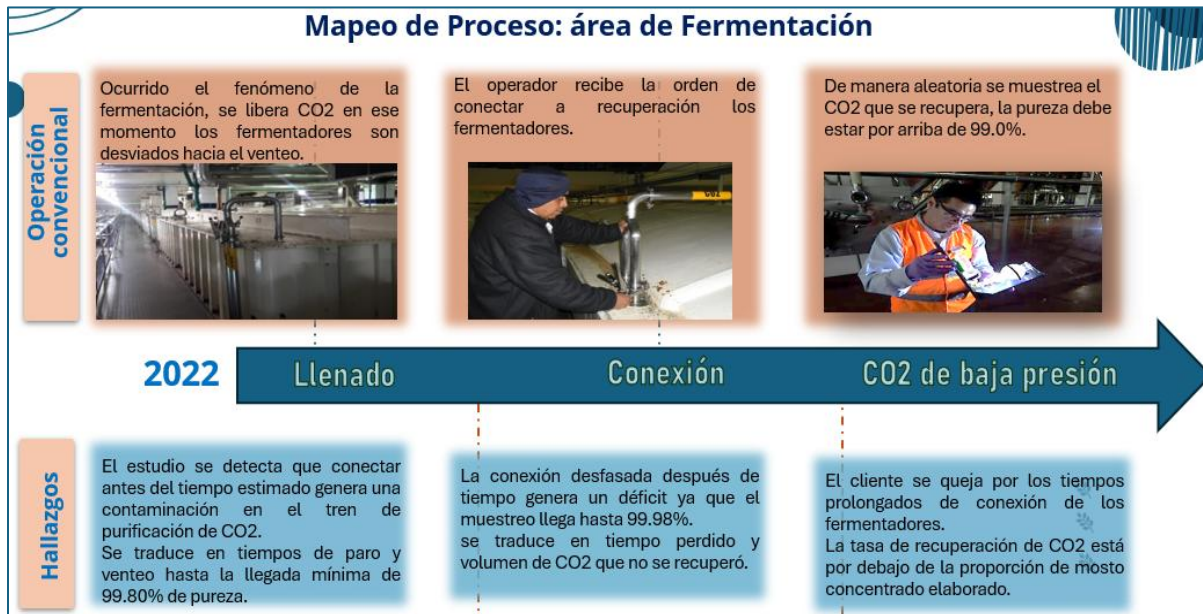


Figura 19. Actividades clave en la etapa de fermentación de cerveza.

Nota: Fuente, elaboración propia.

En la Figura 20 se muestra el mapeo de proceso en las etapas principales de las plantas de CO₂ identificando las actividades relevantes, donde la etapa de recuperación se denota como área de oportunidad que analizaremos para realizar la propuesta de mejora.

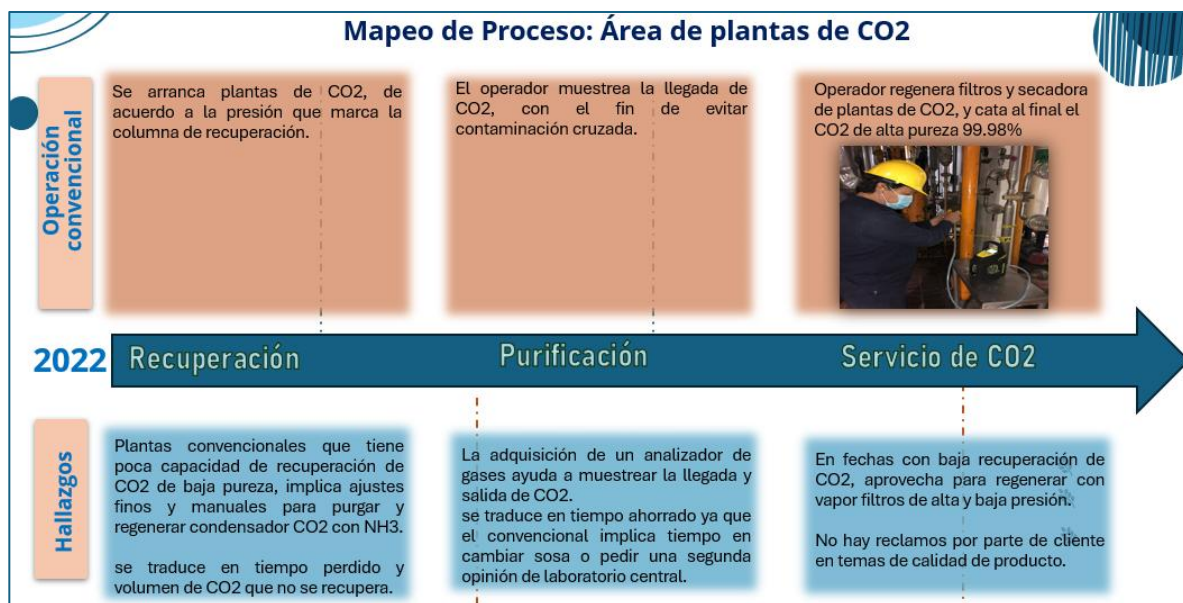


Figura 20. Actividades clave en la etapa de tratamiento de CO₂.

Nota: Fuente, elaboración propia.

Como se puede observar en la Figura anterior, en las dos primeras etapas hay actividades que no son aprovechados para el proceso de recuperación de CO₂ además de que los tiempos de conexión de los tanques fermentadores (cierre de la válvula de venteo hacia la atmósfera y apertura de la válvula de recuperación) hacia las plantas no son efectivas, en la etapa uno y dos son críticos ya que causan un área de oportunidad para aprovechamiento de este insumo,

este tema lo abordaremos a fondo en el capítulo 5: Fase Mejorar, para explicar la propuesta de solución para resolver los tiempos de espera.

2.1.3 DIAGNÓSTICO DE LOS EQUIPOS DE FERMENTACIÓN

Lo que se observó en el proceso es la falta de estandarización para analizar la pureza de CO_2 que generan los tanques fermentadores, laboratorio central solo se ejecuta al azar en diferentes turnos el CO_2 que está en servicio provenientes del tanque de almacenamiento como se muestra en la Figura 21.

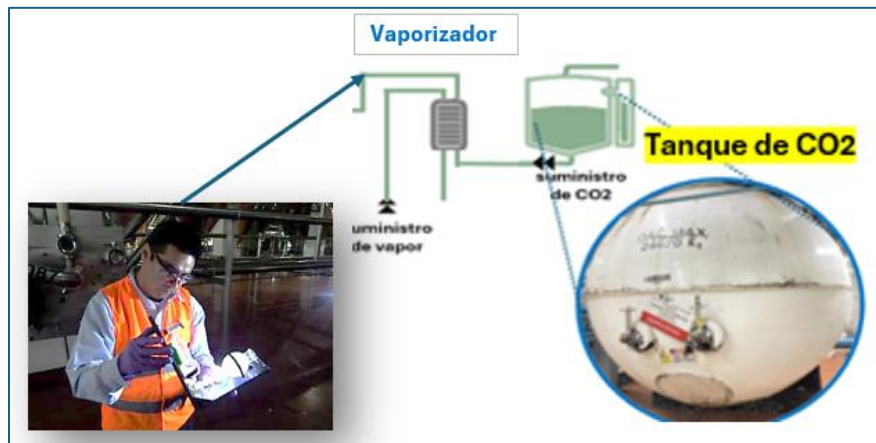


Figura 21. Determinación de pureza de CO_2 de tanque de servicio.

Nota: Fuente, elaboración propia.

Es necesario contar con procedimiento para la operación ambos equipos como lo marca la Figura 22, esto ayuda a que nuestra operación sea más eficiente para tener una mejor trazabilidad en cuanto a la pureza de CO_2 y así evitar contaminación al sistema de purificación de CO_2 .



Figura 22. Diferencia de equipos para determinación de pureza de CO_2 .

Nota: Fuente, elaboración propia.

El proceso de fermentación está muy estructurado y está controlado relativamente, esto lo observamos en el proceso, siendo las áreas de oportunidad que se encontraron son las siguientes:

- La conexión de los tanques fermentadores (cierre de la válvula de venteo hacia la atmósfera y apertura de la válvula de recuperación) hacia el sistema de recuperación de CO₂ no están definidas en un procedimiento, esta actividad se hace de manera tradicional, donde el supervisor de fermentación da la señal al operador para la conexión de la serie de tanques que se deben mandar a recuperación.
- No hay un control visual en los fermentadores, ya que incluso algunos tanques no se conectan y continua hacia el venteo, el operador puede apoyarse consultando la bitácora como se muestra en la Figura 23 sin embargo solo sigue instrucciones por parte del supervisor de fermentación quién es que coordina que tanques llenar según las necesidades.
- No se cuenta con programa para controlar las micro fugas de CO₂ en mirillas y conexiones tipo clamp en tuberías (línea de venteo y línea de recuperación), un sistema de evaluación para determinar la pureza de los tanques fermentadores por parte del departamento de fermentación, además de que esta actividad no es una competencia al personal involucrado.

Bitacora de control de tanques fermentadores								
Fecha de conexión	Unitanque	Hora de conexión	Volumen de Mosto (hL) Real	°P Extrato Inicial Real	°P Final de Fermentación	Tipo de Fermentador [Normal] [Propagador] [Krausen]	Termino de llenado Fecha y hora	Tiempo para conectar a recuperación
31/03/2023	212	10:00:00	600	17.80	4.20	NORMAL	31/03/2023 00:00	18:00:00
31/03/2023	248	10:00:00	600	17.80	4.20	NORMAL	31/03/2023 00:00	18:00:00
31/03/2023	108R	10:00:00	700	17.80	4.20	NORMAL	31/03/2023 00:00	18:00:00
31/03/2023	109R	10:00:00	700	17.80	4.20	NORMAL	31/03/2023 00:00	18:00:00
31/03/2023	113R	10:00:00	700	17.80	4.20	NORMAL	31/03/2023 00:00	18:00:00
31/03/2023	215	13:30:00	600	17.80	4.20	NORMAL	31/03/2023 00:00	18:00:00
31/03/2023	220	13:30:00	590	17.80	4.20	NORMAL	31/03/2023 00:00	18:00:00
31/03/2023	222	13:30:00	580	17.80	4.20	NORMAL	31/03/2023 00:00	18:00:00
31/03/2023	223	13:30:00	600	17.80	4.20	NORMAL	31/03/2023 00:00	18:00:00
31/03/2023	226	13:30:00	600	17.80	4.20	NORMAL	31/03/2023 00:00	18:00:00
31/03/2023	80	13:30:00	310	17.80	4.20	NORMAL	31/03/2023 00:00	18:00:00
31/03/2023	4	14:30:00	310	17.80	4.30	NORMAL	31/03/2023 00:00	18:00:00
31/03/2023	2	14:30:00	310	17.80	4.30	NORMAL	31/03/2023 00:00	18:00:00
31/03/2023	7	14:30:00	310	17.80	4.30	NORMAL	31/03/2023 00:00	18:00:00
31/03/2023	27	14:30:00	310	17.80	4.30	NORMAL	31/03/2023 00:00	18:00:00
31/03/2023	50	14:30:00	310	17.80	4.30	NORMAL	31/03/2023 00:00	18:00:00
31/08/2023	51	14:30:00	310	17.80	4.30	NORMAL	31/03/2023 00:00	18:00:00



Operador haciendo la conexión de tanque

Figura 23. Rutina de llenado de tanques, conexión atmosfera y conexión hacia recuperación.

Nota: Fuente, elaboración propia.

2.1.4 DIAGNÓSTICO DE LOS MÉTODOS Y PROCEDIMIENTOS EN EL AREA DE FERMENTACIÓN DE CERVEZA

El tema de métodos y procedimientos es de suma importancia en todo proceso productivo, a continuación, mostramos algunas de las ventajas del uso de los métodos y procedimiento:

- Son auxiliares en la capacitación del personal
- Describen en forma detallada las actividades de cada puesto
- Se establecen como referencia documental
- Son guías de trabajo a ejecutar

La situación actual del departamento de fermentación en este tema es limitado ya que no tienen control para definir bajo qué otras condiciones se deben conectar los tanques fermentadores a recuperación, el único criterio que se tiene es el tiempo que ocurre entrando a la

fermentación, no se cuenta con la directriz o procedimientos que generen los beneficios que se mencionaron, sin embargo, el área de fermentación recibirá el apoyo del departamento de Energías y Fluidos (E&F) para que a través de ellos se pueda tener la voz de mando para la conexión oportuna de los tanques fermentadores (cierre de la válvula de venteo hacia la atmósfera y apertura de la válvula de recuperación).

2.1.5 D DIAGNÓSTICO DE LOS MANEJO DE CONTROLES VISUALES EN EL AREA DE FERMENTACIÓN DE CERVEZA

Los controles visuales en proceso son muy relevantes, ya que facilitan la comprensión inmediata, la toma de decisiones rápidas y la prevención de errores.

El área de fermentación tiene un área de oportunidad amplia debido a que el manejo de los controles visuales es limitado, a continuación, mencionamos unos ejemplos que impactan en el proceso de recuperación de CO₂ en tanques fermentadores:

- No hay manera de saber que fermentadores conectaron cuando se tiene una concentración alta de O₂ en la llegada hacia la entrada de compresor de CO₂ ya que fermentación cuenta con más de 500 tanques, los cuales no tienen algún indicativo, solo variables para su proceso cervecero.
- Los fermentadores no suelen ser conectados a las 18 horas ya que no hay una persona encargada para esta actividad, incluso algunas veces ignorados ya que su función primordial es bajar la cerveza hacia el área de filtración de cerveza.
- El control de llenado de los tanques no está estandarizado, ocasionalmente hay reboses de cerveza, espuma por el efecto de la fermentación y esto puede traer consecuencias.

Como podemos observar en la Figura 24, el área de fermentación no cuenta con controles visuales de operación de llenado de tanques fermentadores, esto genera retrasos y obstaculiza la operación del tren de purificación de CO₂.

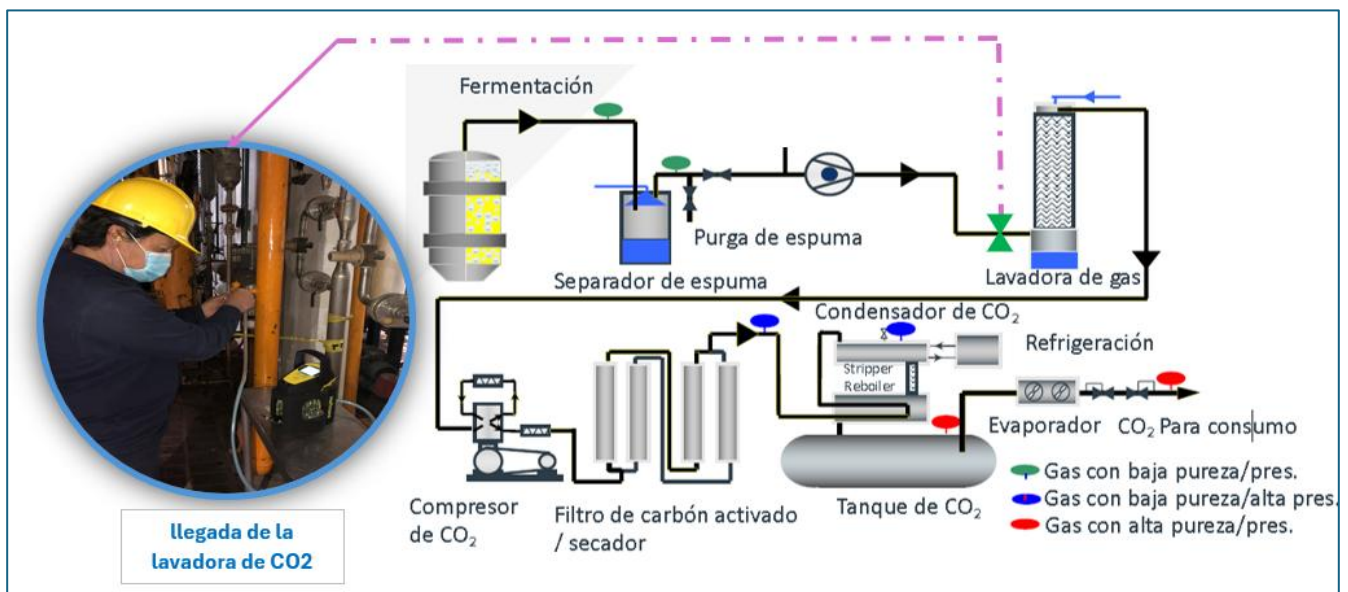


Figura 24. Punto de muestreo de pureza denominada lavadora CO₂.

Nota: Fuente, elaboración propia.

2.2 EL CO₂ EN LA CARBONATACIÓN DE AGUA PARA DILUIR CERVEZA CONCENTRADA.

2.2.1 DIAGNÓSTICO DEL DIAGRAMA DE EQUIPOS: AREA CARBONATACION DE AGUA

A continuación, en la Figura 25 se muestra un bosquejo de la representación del tren carbonatación de agua con CO₂ de la cervecería, hacemos una breve descripción de los demás componentes para entender el flujo.

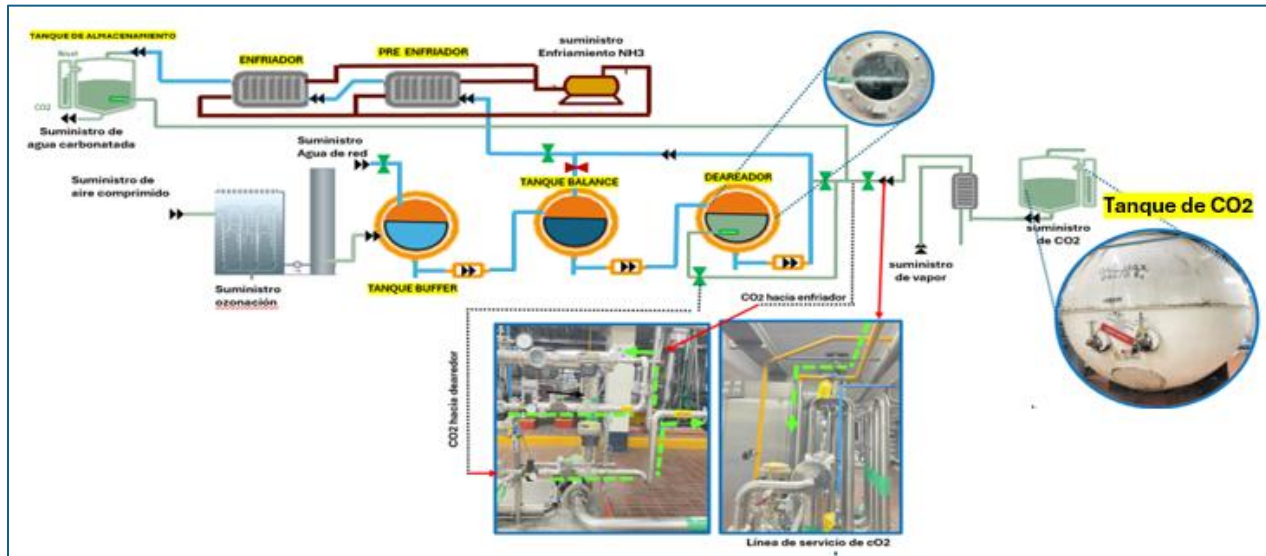


Figura 25. Diagrama de flujo para carbonatar el agua para proceso.

Nota: Fuente, elaboración propia.

Proceso de ozonización: es una técnica efectiva para desinfectar y purificar agua y aire, mediante burbujeo del ozono a través del agua para garantizar resultados seguros y eficaces; el ozono se genera típicamente mediante un generador de ozono, que convierte el oxígeno molecular (O₂) en ozono (O₃) a través de una descarga eléctrica controlada.

Proceso de desaireador: Es una técnica utilizada para eliminar el oxígeno disuelto en el agua con dióxido de carbono. Estos están presentes debido a la aireación natural del agua.

Enfriamiento primario: Una vez que se ha producido el agua carbonatada, esta es enfriada a 10°C a través de un intercambiador de calor. Esto se hace posible cuando el agua y amoníaco se cruzan entre placas sin que se mezclen, mediante el contacto indirecto.

Enfriamiento final: el agua carbonatada vuelve a pasar través de un intercambiador de placas, donde es enfriado nuevamente con amoníaco para controlar la temperatura de -1°C del agua carbonatada para ser enviada a los tanques de almacenamiento y la distribución para garantizar que la bebida conserve su efervescencia.

2.2.2 DIAGNÓSTICO DE MAPEO DE PROCESO DE LA CARBONATACION DEL AGUA

A continuación, se muestra el mapeo de proceso para la carbonatación del agua con la finalidad de identificar brechas que no agregan valor dentro del proceso y con ello planear la estrategia para reducir el consumo CO_2 en el agua a corto plazo.



Figura 26. Actividades clave en la etapa de carbonatación del agua.

Nota: Fuente, elaboración propia.

Como se puede observar en la Figura 26, en la etapa del deareador hay una brecha importante que se debe considerar, el consumo de CO_2 no está controlado, además de que los tiempos de inyección de CO_2 son muy larga y en ocasiones se eleva la concentración de CO_2 en el agua.

En la etapa de carbonatación el castigar la inyección de CO_2 , tiende a traer consecuencias con el bajo porcentaje de CO_2 puede afectar directamente al producto final generando un retrabajo volviéndose un área de oportunidad para aprovechamiento de este insumo en esta primera etapa de producción de cerveza, este tema lo vamos a analizar más a fondo en el capítulo 5: Fase Mejorar para dar la propuesta de solución para resolver los tiempos de espera.

2.2.3 DIAGNÓSTICO DEL EQUIPO MEDICION DE CARBONATACION DE AGUA

Lo que se observó en el proceso es la falta de estandarización para controlar la presión de servicio de CO_2 y a su vez controlar el volumen de CO_2 que tiene el agua carbonatada, el operador de esta área ejecuta el muestro 2 veces en el turno como se muestra en la Figura 27.

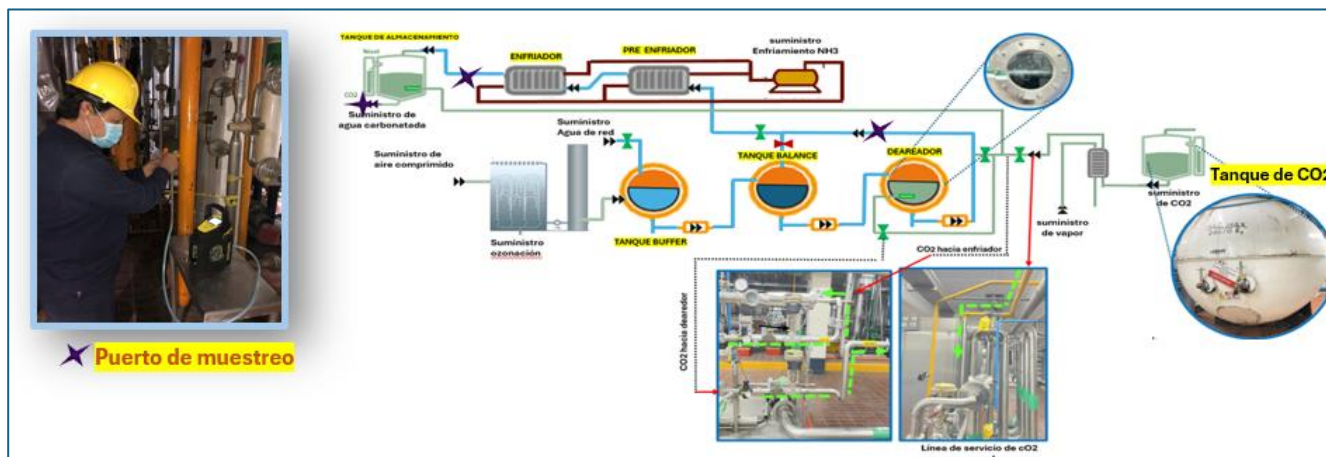


Figura 27. Punto de muestreo para determinar contenido de CO₂ en porcentaje.

Nota: Fuente, elaboración propia.

Es necesario contar con el procedimiento para la operación del analizador de O₂, esto ayudaría a que nuestra operación sea más eficiente para tener una mejor trazabilidad para controlar el porcentaje de CO₂ que contiene el agua carbonatada como se ve en la Figura 28 y así evitar contaminación por alto contenido de O₂ o en su defecto que la carbonatación sea muy pobre afectando directamente al producto actualmente, este equipo lo es compartido con personal de filtración de cerveza, por lo que contar con uno para esta área sería de mucha ayuda.



Figura 28. Aparato Haffman mide porcentaje CO₂ en el agua.

Nota: Fuente, elaboración propia.

2.2.4 DIAGNÓSTICO DE MÉTODO Y PROCEDIMIENTO PARA DETERMINAR VOLUMEN DE CO₂ EN LA CARBONATACION DE AGUA

El proceso carbonatación en esta primera etapa está muy estructurado y está controlado relativamente, esto lo observamos en el proceso y las áreas de oportunidad que se encontraron son las siguientes:

- La presión de CO₂ no está regulada como debiera de ser, los rangos permitidos están muy abiertos, esto definido en un procedimiento de operación del sistema de carbonatación de agua, este procedimiento se hace de manera práctica donde el supervisor del departamento de Energías y Fluidos (E&F) da seguimiento de manera aleatoria la concentración de CO₂ donde arriba de 3% es mejor para el proceso cervecero.

- Hay control visual en manómetros en los sistemas de carbonatación de agua, pero estas no tienen rango de aceptación, cada operador de cada turno puede llegar a manipular el servicio de CO₂ y algunas veces no se reporta en la bitácora.
- Los tanques de almacenamiento no cuentan con sensores que midan el O₂ o la concentración de CO₂ es por ello por lo que ocasionalmente se regula de manera manual la inyección de CO₂ ajustando el porcentaje de concentración de CO₂.

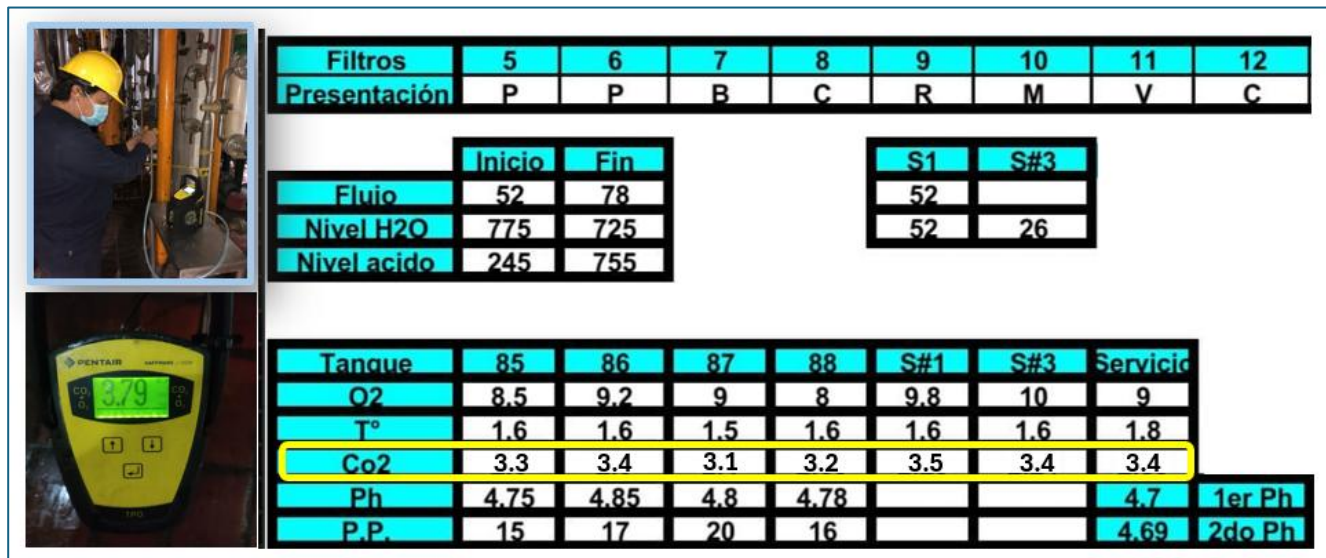


Figura 29. Muestreo de contenido de CO₂ en porcentaje en la carbonatación de agua.

Nota: Fuente, elaboración propia.

La situación actual del área de carbonatación de agua tiene área de oportunidad ya que no tiene bien definido el estándar para controlar el volumen de CO₂ en el agua tal como se muestra en la Figura 29, no cuentan con la directriz o procedimiento que hable sobre la cantidad mínima ya que cliente el área de filtración jamás ha tenido inconvenientes con los atributos del agua carbonatada, sin embargo, el área de carbonatación de agua recibirá el apoyo por el personal del departamento de Energías y Fluidos (E&F) para que a través de ellos se pueda tener claro un control más exacto del consumo de CO₂

- En ocasiones no es clara la información la pureza de CO₂ que tiene el tanque de servicio por parte del departamento de Energías y Fluidos (E&F) esto puede afectar aumentando el O₂ en los sistemas de agua carbonatada.
- El control de O₂ del sistema de agua carbonatada presenta un margen de error y el sistema reacciona de forma automática para inyectar más CO₂ para retirar el oxígeno disuelto.

Como podemos observar en la Figura anterior, el área de carbonatación de agua tiene medición, sin embargo, no cuenta con controles visuales de operación para modular la concentración de CO₂, esto genera retrasos y obstaculiza la operación del tren de carbonatación de agua.

2.3 LA INYECCIÓN DE CO₂ EN LA FILTRACIÓN DE CERVEZA DILUIDA.

A continuación, se muestra un bosquejo de la representación del tren de filtración de la cerveza de la fábrica, dónde se explica de manera breve descripción de los demás componentes para entender el flujo.

La filtración de la cerveza es un proceso crítico en la producción de cerveza que implica la eliminación de partículas suspendidas, levaduras y otros sólidos para lograr una cerveza clara y brillante, a continuación, en la Figura 30, se detallan las etapas de filtración de la cerveza:

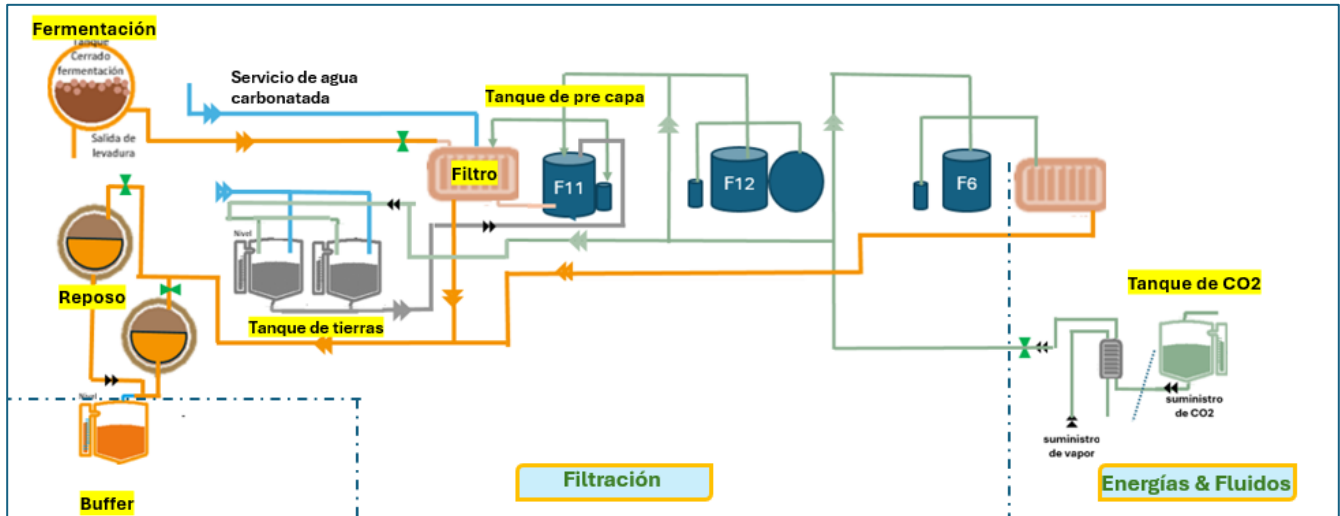


Figura 30. Diagrama de flujo del sistema de filtración de cerveza.

Nota: Fuente, elaboración propia.

- **Filtración gruesa:** La cerveza concentrada pasa a través de un filtro de medio grueso para eliminar las partículas más grandes. Este filtro es un cartucho utilizado en la cervecería.
- **Filtración fina:** Después de la filtración gruesa, la cerveza se pasa a través de un filtro de medio fino para eliminar partículas más pequeñas y levaduras residuales. Esto puede lograrse utilizando filtros de tierra de diatomeas.
- **Tanque pre-capa:** Etapa importante en el proceso de filtración de cerveza que ayuda a mejorar la eficiencia y la calidad del filtrado al crear una capa uniforme y estable de material filtrante sobre el medio filtrante principal.
- **Carbonatación:** Después de la filtración y esterilización, la cerveza es carbonatada añadiendo dióxido de carbono para proporcionarle su efervescencia para garantizar que la cerveza conserve su sabor y características químicas.
- **Tanques de reposo:** Finalmente, la cerveza filtrada y carbonatada se almacena en tanques refrigerados antes de ser o envasada en diferentes presentaciones para su distribución y consumo.

2.3.1 DIAGNÓSTICO DEL MAPEO DE PROCESO DE LA FILTRACIÓN DE CERVEZA

A continuación, se muestra el mapa de proceso del área de filtración de cerveza, con la finalidad de analizar las áreas de oportunidad que no agregan valor dentro del proceso.

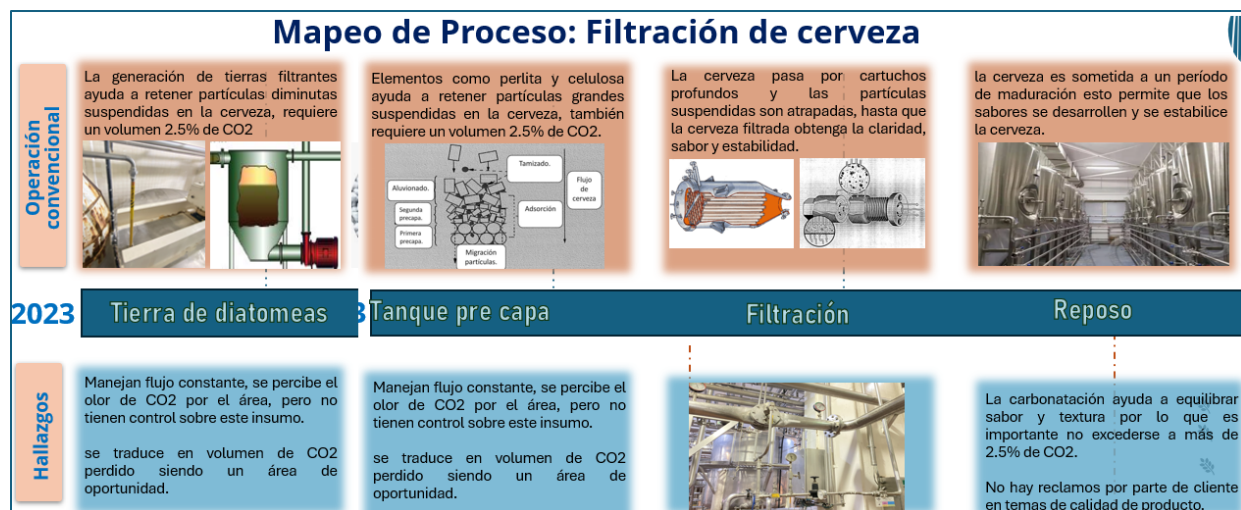


Figura 31. Actividades clave en la etapa de filtración de cerveza

Nota: Fuente, elaboración propia.

Como se puede observar en la Figura 31, en las dos primeras etapas hay una brecha importante que se debe considerar, el consumo de CO₂ no está controlado además de que los tiempos de inyección de CO₂ son muy efectivas, en la etapa uno y dos son críticos ya que el bajo porcentaje de este insumo puede afectar directamente al producto final generando un retrabajo volviéndose un área de oportunidad para aprovechamiento de este insumo en esta primera etapa de producción de cerveza, este tema lo vamos a analizar más a fondo en el capítulo 5: Fase Mejorar para dar la propuesta de solución para resolver los tiempos de espera.

2.3.2 DIAGNÓSTICO DEL EQUIPO MEDICION DE VOLUMEN DE CO₂ EN LA FILTRACIÓN DE CERVEZA

Lo que se observó en el proceso es la falta de estandarización para controlar la presión de servicio de CO₂ y a su vez controlar el volumen de CO₂ que tiene la carbonatación en la cerveza, el operador de esta área ejecuta el muestreo 2 veces en el turno, a continuación, en la Figura 32 mostraremos cuales son los puntos de muestras para determinar el contenido de CO₂ adherido a la cerveza.



Es necesario contar con el procedimiento para la operación del analizador de O₂, esto ayuda a que nuestra operación sea más eficiente para tener una mejor trazabilidad para controlar el porcentaje de CO₂ que contiene la cerveza, como se ve en la Figura 33 y así evitar contaminación por alto contenido de O₂ o en su defecto que la carbonatación sea limitada afectando directamente al producto.

Figura 32. Aparato Haffman mide concentración de CO₂ en la cerveza.

Este bloque se torna crítico, ya que como vimos en la introducción sobre las características que aporta el CO₂ hacia el proceso cervecero, el bajo contenido afecta directamente la calidad del producto.

2.3.3 DIAGNÓSTICO DEL MÉTODO Y PROCEDIMIENTO PARA DETERMINAR EL VOLUMEN DE CO₂ EN LA FILTRACIÓN DE LA CERVEZA

El proceso carbonatación en esta primera etapa está muy estructurado y está controlado relativamente, esto lo observamos en el proceso y las áreas de oportunidad que se encontraron son las siguientes:

1. La inyección de CO₂ para filtrar la cerveza no está regulada, está por arriba del rango permitido, a pesar de que la carbonatación de agua está controlada, no se debería utilizar más CO₂ para diluir la cerveza con el agua carbonatada en el área de filtros, el supervisor de cuartos fríos da seguimiento de forma aleatoria la concentración de CO₂ donde algunos tanques están arriba de 3%.

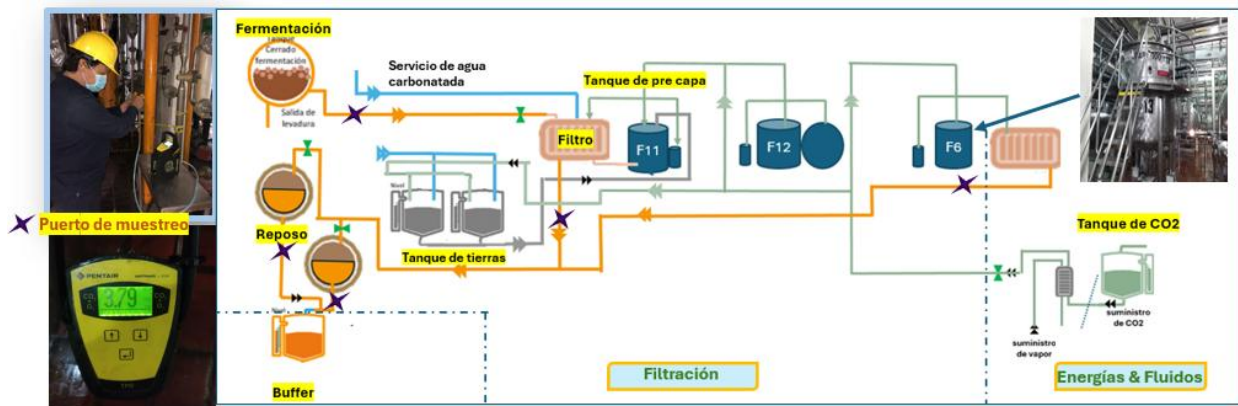


Figura 33. Punto de muestreo para determinar contenido de CO₂ en el área de filtración de cerveza.

Nota: Fuente, elaboración propia.

2. Hay control visual en manómetros en los sistemas de carbonatación en la filtración de la cerveza, pero estas no tienen rango de aceptación, cada operador de cada turno puede llegar a manipular el servicio de CO₂.
3. En ocasiones se regula de manera manual la inyección de CO₂, ajustando el porcentaje de concentración de CO₂ donde los operadores del área de filtración de cerveza piensan que entre más CO₂ contenga la cerveza es mejor, tal como se ve en la Figura 34, donde registran en la bitácora atributos sobre la filtración de cerveza.

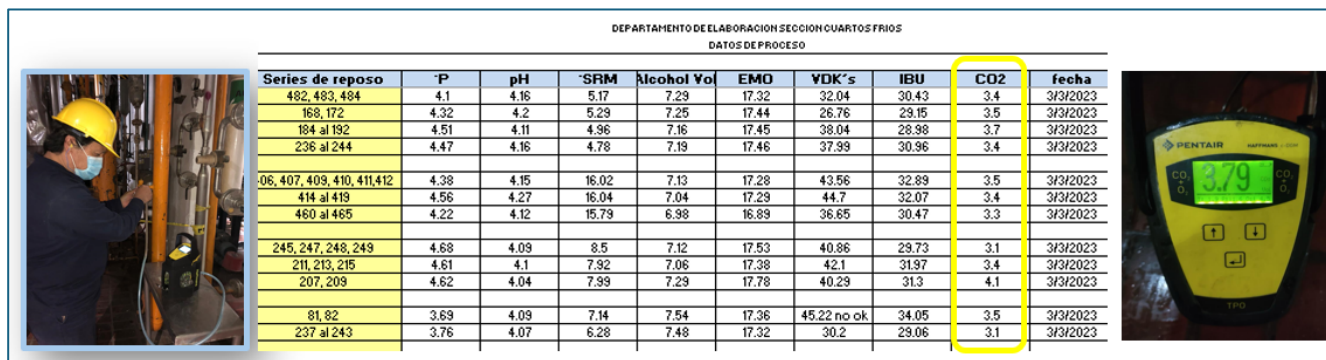


Figura 34. bitácora de control de contenido de CO₂ en el área de filtración de cerveza.

Nota: Fuente, elaboración propia.

La situación actual del área de filtración de cerveza tiene como área de oportunidad un estándar definido para controlar el volumen de CO₂ en la cerveza, no cuentan con la directriz o procedimiento que hable sobre la cantidad mínima ya que jamás ha tenido inconvenientes con los atributos de la propia carbonatación de la cerveza sin embargo, el área de filtros recibirá el apoyo por parte del personal del departamento de Energías y Fluidos (E&F) para que a través de ellos se tenga la claridad sobre un control más exacto del consumo de CO₂.

2.3.4 DIAGNÓSTICO DEL MANEJO DE CONTROLES VISUALES PARA EL AREA DE FILTRACIÓN DE CERVEZA

Los controles visuales son elementos fundamentales en los sistemas de gestión de procesos ya que estos simplifican las tareas además de mejorar un proceso.

A continuación, mencionamos ejemplos claros de falta de controles visuales para el proceso de carbonatación en la filtración de cerveza:

- En ocasiones no es clara la información de la pureza de CO₂ que tiene el tanque de servicio por parte del departamento de Energías y Fluidos (E&F), si se tiene un servicio de CO₂ con una pureza debajo de 99.98% puede afectar el proceso aumentando el O₂ en la filtración de la cerveza lo que implica inyectar más CO₂ para controlar la efervescencia de la cerveza y así desplazar el oxígeno disuelto.

Como podemos observar en la Figura 27, el área de almacenamiento de CO₂ operada por el departamento de E&F cuenta con una medición local de los siguientes parámetros, presión de servicio de 15 kg/cm² y una pureza de 99.99% sin embargo, el área de filtración de cerveza no cuenta con controles visuales que indique en tiempo real la concentración de CO₂ que tiene la cerveza diluida, esto genera retrasos y obstaculiza la operación del tren de filtración de cerveza.

2.4 ADICIÓN DE CO₂ EN EL ENVASADO DE CERVEZA.

A continuación, en la Figura 33 se muestra un bosquejo de la representación de área de envasado de cerveza, a su vez hacemos una breve descripción de los componentes para entender el flujo.

La filtración de la cerveza es un proceso crítico en la producción de cerveza que implica la eliminación de partículas suspendidas, levaduras y otros sólidos para lograr una cerveza clara y brillante. A continuación, se detallan las etapas de filtración de la cerveza:

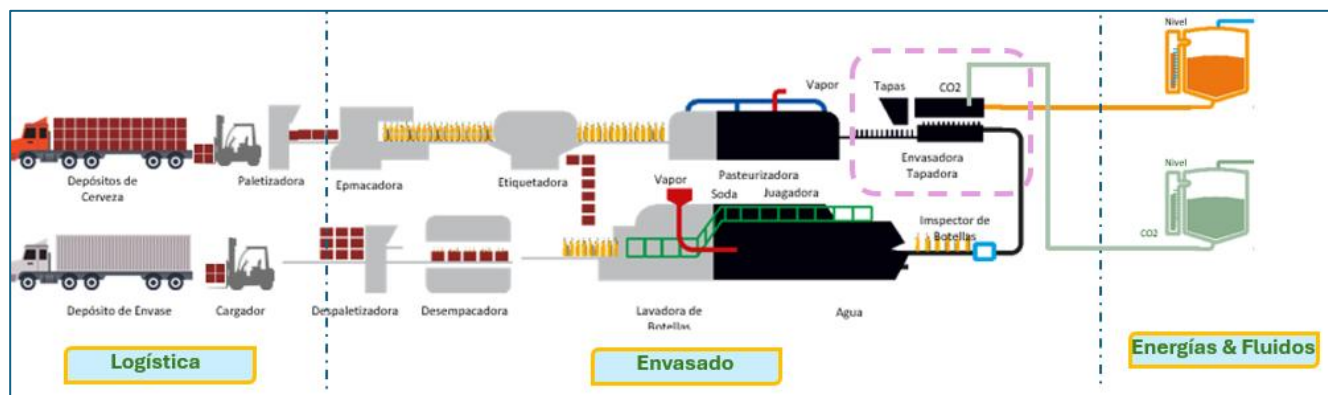


Figura 35. Diagrama de flujo para envasar la cerveza.

Nota: Fuente, elaboración propia.

- Desempacadora: se valida que las botellas estén en buenas condiciones para garantizar que estén libres de cualquier contaminación que pueda afectar la calidad de la cerveza, mientras son apiladas, en caso de ser presentaciones retornables pasan por un proceso de selección previo.
- Tanque buffer: La cerveza se transfiere desde los tanques de reposo refrigerados a la línea de embotellado, la transferencia de la cerveza se realiza mediante bombas y tuberías sanitarias para evitar la contaminación.
- Llenado de botellas: Una vez que la cerveza está lista, se inicia el proceso de barrido de oxígeno con CO₂, después empieza el llenado automático con cerveza. Este proceso se realiza de manera cuidadosa para minimizar la formación de espuma y garantizar un llenado adecuado y consistente.
- Sellado de botellas: Después de llenar las botellas con cerveza, se sellan herméticamente para evitar la entrada de aire u otros contaminantes. Esto se puede hacer utilizando tapas de corona que se aplican automáticamente sobre las botellas llenas.
- Pasteurización: después de que las botellas se han llenado y sellado con la cerveza, La pasteurización garantizar la seguridad y la calidad del producto, especialmente cuando se trata de cervezas que se distribuyen y se almacenan durante períodos prolongados.
- Calentamiento: las botellas alcanzan la temperatura deseada, esta se mantiene durante un período crucial para asegurar la destrucción de los microorganismos presentes en la cerveza.

- Enfriamiento: las botellas pasan por una sección de enfriamiento donde se reduce rápidamente la temperatura con el fin de detener el proceso de pasteurización y evita que la cerveza sufra cambios no deseados en su sabor o calidad debido al calor.
- Inspección de calidad: las botellas se someten a una inspección de calidad para detectar posibles defectos, como botellas vacías, tapas mal selladas o contaminación visible.

2.4.1 DIAGNÓSTICO DEL MAPEO PROCESO DEL AREA DE ENVASADO

A continuación, se muestra el mapeo de proceso para el área de envasado, con la finalidad de analizar las áreas de oportunidad y se planifica la estrategia para mejorar la aplicación de CO₂ a corto plazo.

Como se puede notar en la Figura 36, la única etapa crítica de este proceso tiene una brecha el consumo de CO₂ ya que no se controla la inyección de CO₂ al realizar el cambio de atmosfera para hacer el barrido de oxígeno disuelto en la botella ya que si no se hace de manera correcta puede afectar directamente al producto final generando y si tiene mucho contenido de CO₂ genera un abombamiento en latas de aluminio hasta incluso que explote botellas de vidrio, volviéndose una área de oportunidad para aprovechamiento de este insumo en esta última etapa del envasado, este tema lo abordaremos a fondo en el capítulo 5: Fase Mejorar para dar la propuesta de solución para controlar la inyección de CO₂.

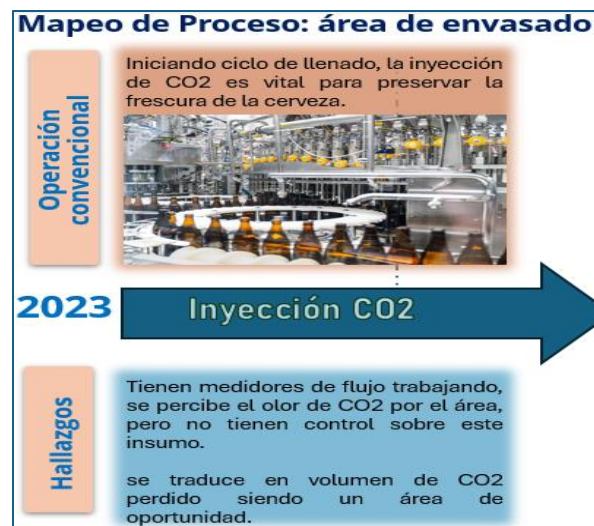


Figura 36. Actividades clave en la etapa de envasado de cerveza

Nota: Fuente, elaboración propia.

2.4.2 DIAGNÓSTICO DEL EQUIPO PARA DETERMINAR VOLUMEN DE CO₂ EN LA LLENADORA DE CERVEZA.

Lo que se observó en el proceso es la falta de estandarización para controlar la presión de servicio de CO₂ y a su vez controlar la exposición de CO₂ que se genera al aplicar inyecciones cíclicas en cada llenado de botella, el operador de esta área no da seguimiento al consumo ni concentración de CO₂.

Es necesario contar con el procedimiento para la operación del analizar la concentración de CO₂ en la atmosfera, esto ayudará a que nuestra operación sea más eficiente para tener una mejor trazabilidad para controlar el consumo de CO₂, así como controlar la concentración en la llenadora y así evitar contaminación por contenido de O₂, o en su defecto, un daño hacia la salud por la concentración de CO₂ que hay en entorno de la llenadora.



Figura 37. Muestreo aleatorio de concentración de CO₂.

Nota: Fuente, elaboración propia.

2.4.3 DIAGNÓSTICO DEL MÉTODO Y PROCEDIMIENTO CARBONATACION EN LA LLENADORA DE CERVEZA

El proceso carbonatación en esta etapa está no está estructurado no hay control relativo del uso de CO₂, esto lo observamos en el proceso, siendo las áreas de oportunidad las siguientes:

- La presión de CO₂ no está regulada como debiera de ser, los rangos permitidos están muy abierto esto no está definido en el procedimiento de operación de la llenadora, la actividad para determinar el volumen de CO₂ en la cerveza se hace de manera práctica donde el supervisor de envasado da seguimiento de forma aleatoria el contenido de CO₂ donde arriba de 3% es mucho mejor para el proceso cervecero como se muestra en la Figura 38.
- Hay control visual en manómetros en los sistemas de suministro de CO₂, pero estos no tienen rango de aceptación, cada operador de cada turno puede llegar a manipular el servicio de CO₂.
- En ocasiones no se regula la inyección de CO₂ debido a la falta de ejecución de pruebas de hermeticidad y pruebas de estanqueidad que debe realizarse al inicio y corte de producción.



Figura 38. Muestreo aleatorio de volumen de % CO₂ en llenadoras del área de envasado.

Nota: Fuente, elaboración propia.

La situación actual del área de envasado de cerveza sobre el CO₂ es que no tiene bien definido el estándar para controlar la presión y el volumen de CO₂ para el cambio de atmosfera y retirar el O₂ que tiene la botella antes de ser llenada con cerveza, no cuentan con la directriz o procedimiento que hable sobre la cantidad mínima de CO₂ que debe contener la cerveza ya que el departamento de aseguramiento de calidad rara vez tiene inconvenientes con atributos como la baja carbonatación de la cerveza, sin embargo, el área de envasado recibirá el apoyo por el personal del departamento de Energías y Fluidos (E&F) para que a través de ellos se tenga la claridad sobre un control más exacto del consumo de CO₂ sin afectar la calidad del producto.

2.4.4 DIAGNÓSTICO DEL MANEJO DE CONTROLES VISUALES EN EL AREA DE ENVASADO

A continuación, mencionamos ejemplos de falta de controles para el proceso de carbonatación en la filtración de cerveza:

- En ocasiones no es clara la información de contenido de CO₂ que tiene el tanque buffer de cerveza hacia la llenadora esto puede afectar en el llenado de la botella por ende hay concentración de CO₂ a pie de máquina.
- El área de envasado no cuenta con medidores de gases, por lo que debe pedir el apoyo para que seguridad industrial analice la concentración de CO₂.

Como podemos observar en la Figura anterior, el área de envasado tiene medición, sin embargo, no cuenta con controles visuales de operación para modular el consumo de CO₂, esto genera una deficiencia en el control de este insumo valioso y obstaculiza la mejora de su aplicación.

3. FASE MEDIR: EVALUACIÓN DEL SISTEMA DE CAPTACIÓN Y USO DE CO₂ EN LAS ÁREAS PRODUCTIVAS

3.1 EVALUACION DEL SISTEMA DE RECUPERACION DE CO₂

Con el mapa SIPOC tenemos un panorama más claro sobre el proceso de la fermentación de la cerveza por parte del equipo de elaboración, donde se genera CO₂ como subproducto y se recupera y posterior a ello usado en procesos internos como la carbonatación y embotellado, reduciendo emisiones y costos, misma que se vuelve crítico para la ser autosuficientes con este insumo.

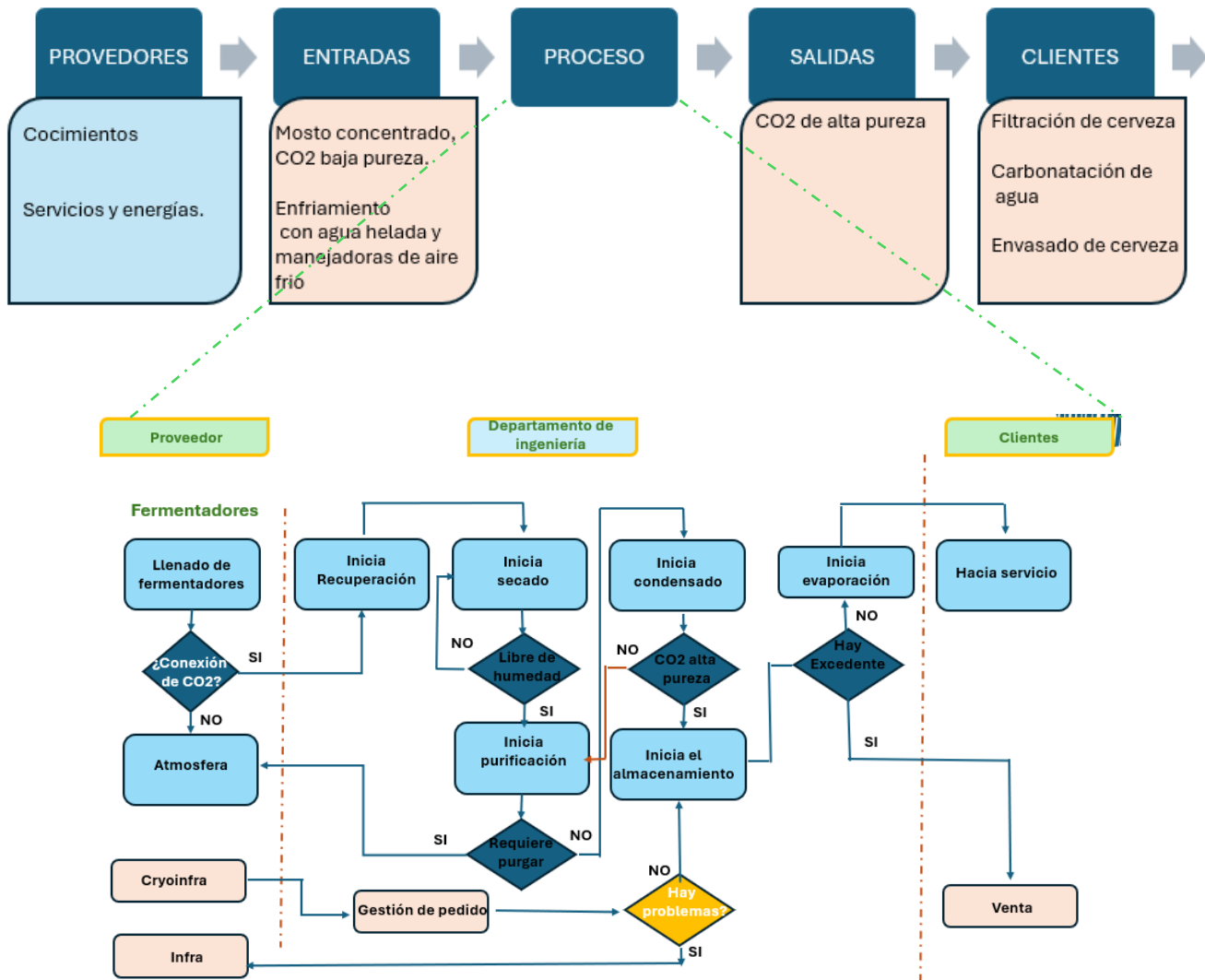


Figura 39. Diagrama SIPOC sobre el tratamiento de CO₂.

Nota: Fuente, elaboración propia.

A continuación, comparto detalles clave del proceso:

- Visualiza la trazabilidad del CO₂ desde su generación hasta la purificación.

- Validar los puntos críticos de control (PCC) para garantizar la pureza del gas a través del su tratamiento.
- Mejorar el desempeño energético y reducir la dependencia de CO₂ externo.
- El análisis de gases (O₂, impurezas, humedad) es clave en la purificación garantizando la calidad del dióxido de carbono.

3.1.1 EVALUACION DEL PLAN DE RECOLECCIÓN DE DATOS EN EL AREA DE FERMENTACIÓN

El muestreo ejecutado basado en el tiempo de conexión de los tanques de fermentadores como esquema habitual (18 horas ocurrido la fermentación), se dividió en tres partes como se muestra a continuación:

- Número de tanques que son llenados y están dirigidos hacia venteo.
- Número de tanques fermentadores que son conectados a recuperación.
- Número de plantas de CO₂ que están trabajando.

El plan de recolección de datos nos indica la problemática actual como se muestra en la tabla 6, donde podemos ver el resumen diario de la captura de CO₂ que se genera con base al mosto preparado la cual no es suficiente para lograr la meta diaria, lo cual se traduce en una recuperación deficiente manera general en periodo mensual sobre CO₂.

Tabla 6. Bitácora de captura planeada vs recuperado actual de CO₂.

Fecha: 05/03/2023		Captacion								Recuperación [Kg]		
	Fecha	Produccion de Mosto (hL) Real	1° Dia	2° Dia	3° Dia	4° Dia	5° Dia	6° Dia	7° Dia	Plan - [Kg]	Produccion Real [Kg]	GAP [Kg]
sáb	11/03	21,834	11,474	30,961	36,822	24,563	10,597	5,373	2,003	95,072	98,718	3,646
dom	12/03	24,306	12,034	33,476	40,628	27,582	11,993	5,949	2,352	108,001	101,010	-6,991
lun	13/03	6,267	637	6,170	10,945	9,430	4,482	1,689	1,224	105,411	93,521	-11,890
mar	14/03	23,675	9,870	30,927	40,264	28,913	12,873	5,963	2,797	91,861	70,869	-20,992
mié	15/03	19,948	7,517	24,063	31,682	22,942	10,249	4,701	2,257	87,674	87,807	133
jue	16/03	28,293	11,518	36,001	46,807	33,578	14,944	6,931	3,241	97,058	94,619	-2,439
vie	17/03	18,158	7,369	23,584	31,049	22,482	10,044	4,607	2,212	107,087	90,929	-16,158

Nota: Fuente, elaboración propia.

Con base a lo anterior, es importante identificar las brechas por el cual la recuperación actual no es la adecuada para atender la demanda de uso de CO₂ para las áreas de carbonatación de agua, filtración y envasado de cerveza tal como se describe en la Figura 40, de manera que es necesario analizar el proceso recuperación de CO₂ para encontrar la causa raíz por el cual no se logra la recuperación diaria, ya que como podemos ver en la Figura 41, notamos que el factor de consumo de CO₂ es más alto que el factor de recuperación, lo que se traduce en compra de CO₂ al mercado externo.

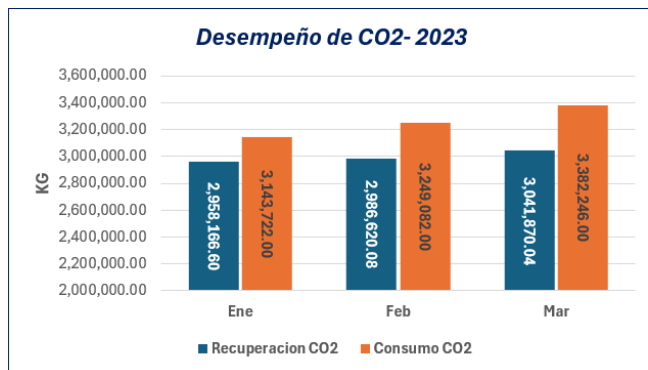


Figura 41. Déficit en la recuperación de CO₂.
Nota: Fuente, elaboración propia.

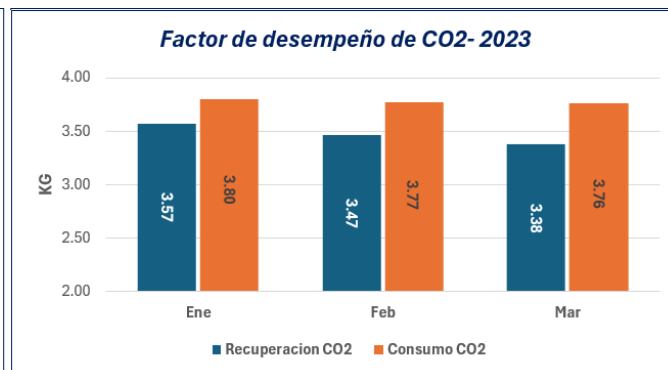


Figura 40 Factor de captura de CO₂ por abajo del consumo.
Nota: Fuente, elaboración propia.

Conclusión

La situación actual del área fermentación generó una preocupación en la organización, como podemos ver actualmente, la recuperación no cubre la demanda de CO₂ para la carbonatación en los procesos de elaboración de cerveza, por otra parte, tocará analizar y prestar atención sobre el uso de CO₂, si la aplicación es la ideal, el planteamiento de esta investigación es buscar un balance apropiado para la reutilización de CO₂ para ser autosuficientes.

3.1.2 EVALUACION DE PROCEDIMIENTO PARA REALIZAR METODO DE CAPTURA DE CO₂ EN LOS SALONES DE FERMENTACIÓN

La toma de tiempos con los que realizaremos la prueba se dividió en cuatro partes como se muestra a continuación:

- Número de tanques que son llenados y están dirigidos hacia venteo.
- Número de tanques fermentadores que son conectados a recuperación.
- Cantidad de equipo de O₂ que reciben en la llegada de la lavadora.
- Número de tanques que se irán conectando.

Para obtener una muestra representativa y obtener mejores resultados en el análisis de la prueba, se decidió contabilizar las horas actuales de conexión de los tanques fermentadores hacia recuperación (cierre de la válvula de venteo hacia la atmósfera y apertura de la válvula de recuperación) 3 horas antes de cumplir 18 horas de cada fermentador que llegan a la fila, para ser atendidas, asegurándose de que estos son conectados hacia recuperación debidamente; por otra parte los fermentadores que se van desconectando al cumplir su ciclo de fermentación.

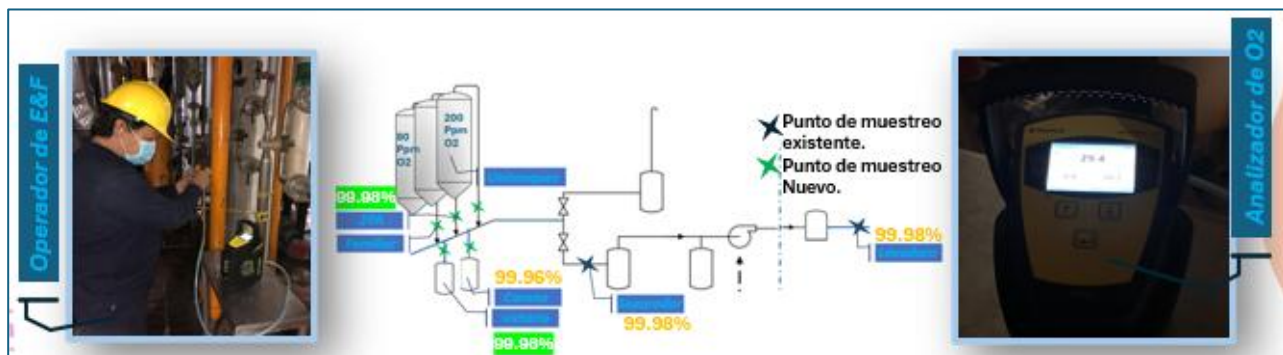


Figura 42. Punto de muestreo para determinar pureza de CO₂ en fermentadores.

Nota: Fuente, elaboración propia.

La Figura 42 muestra el flujo CO₂ que libera cada tanque como parte de los salones de fermentación, distribuidos en el cabezal principal de conexión hacia recuperación para ser capturado y purificado, donde se recopila la siguiente información como se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 7. Muestreo de pureza de CO₂ en el área de fermentación.

Turno	Salon	Fecha	Hora	PPM O2	Pureza
3er Turno	Familiar	03/04/2022	03:00:00 p. m.	35.0000	99.98329
	Negra	03/04/2022	03:00:00 p. m.	29.0000	99.98616
	Corona	03/04/2022	03:00:00 p. m.	80.0000	99.96181
	2PA	03/04/2022	03:00:00 p. m.	28.0000	99.98663
	Victoria	03/04/2022	03:00:00 p. m.	38.0000	99.98186
	Separador de de espuma planta 4	03/04/2022	03:00:00 p. m.	28.0000	99.98663
	Separador del salon victoria	03/04/2022	03:00:00 p. m.	39.0000	99.98138
	Tanque de servicio No.	03/04/2022	03:00:00 p. m.	26.0000	99.98759
	Familiar	03/04/2022	08:00:00 a. m.	35.0000	99.98329
2do Turno	Negra	03/04/2022	08:00:00 a. m.	29.0000	99.98616
	Corona	03/04/2022	08:00:00 a. m.	80.0000	99.96181
	2PA	03/04/2022	08:00:00 a. m.	28.0000	99.98663
	Victoria	03/04/2022	08:00:00 a. m.	38.0000	99.98186
	Separador de de espuma planta 4	03/04/2022	08:00:00 a. m.	28.0000	99.98663
	Separador del salon victoria	03/04/2022	08:00:00 a. m.	39.0000	99.98138
	Tanque de servicio No.	03/04/2022	08:00:00 a. m.	31.0000	99.98520
	Iguadora del Sensor	03/04/2022	08:00:00 a. m.	22.0000	99.98950
	Familiar	03/04/2022	08:00:00 a. m.	25.0000	99.98807
	Negra	03/04/2022	08:00:00 a. m.	21.0000	99.98998

Nota: Trazabilidad de pureza después de haber transcurrido 18 horas fermentación.

En la tabla anterior notamos la tendencia ppm de O₂ que fluye sobre el punto de muestreo denominado separador de espuma y cómo se comporta la pureza de CO₂ en el área de fermentación, donde tenemos una variable fija de lapsos de cada 18 horas en el que cada tanque se envía hacia recuperación.



Figura 43. Trazabilidad de la pureza de CO₂ donde los fermentadores se conectan a 18 horas.

Nota: Fuente, elaboración propia.

Como podemos observar en la Figura 43, la serie de tanques que llegan después conectarse a 18 horas ocurrido la fermentación, el comportamiento de la pureza en función a ppm no son las mismas que se conectan en cada tanque; por ejemplo, en 10 minutos en promedio se conectan 8 tanques, estos se conectan uno por uno por lo que ya tenemos esperando tanques que deben ser atendidos, como podemos observar en el gráfico todas las llegadas son constantes y hay un déficit en todo el proceso de recuperación de CO₂.

CONCLUSIÓN DEL PROCEDIMIENTO DE CAPTURA DE CO₂

Las conclusiones del análisis de los procesos de la cervecería son los siguientes:

- A través del estudio de la trazabilidad la pureza de CO₂, para la fase: Analizar, aplicaremos histogramas y se realizaran las pruebas para presentar las mejores propuestas para mejorar los tiempos de conexión de tanques fermentadores.
- El tiempo de conexión de los tanques fermentadores (cierre de la válvula de venteo hacia la atmósfera y apertura de la válvula de recuperación) no es el adecuado por lo que en la fase: Mejorar propondré un esquema que favorezca el proceso de recuperación de CO₂ para agilizar el proceso de determinación de tiempos de conexión en función la ppm de O₂ que liberan cada salón de fermentación.
- Analizaremos las actividades del personal para determinar roles y responsabilidades de las actividades para la determinación de la pureza para el proceso de mejora.
- Realizaremos la propuesta para mejorar la capacidad de recuperación de CO₂.

Tabla 8. Equipo instalado de captación CO₂.

Capacidad instalada				
Clase	Plantas CO ₂	Pureza min	KG/H	KG/Día
streaper	P1	98%	1,000	24,000
Convencional	P2	99.95%	500	12,000
Convencional	P3	99.95%	500	12,000
Convencional	P4	99.95%	500	12,000
Convencional	P5	99.95%	500	12,000
Convencional	P6	99.95%	500	12,000
streaper	P7	98%	2,000	48,000
			5,500	132,000

Nota: Fuente, elaboración propia.

3.2 USO DE CO₂ PARA CARBONATACIÓN DE AGUA PARA DILUIR CERVEZA CONCENTRADA

Con el mapa SIPOC tenemos un panorama más claro el proceso sobre la carbonatación del agua que es elaborada por parte del equipo de E&F, misma que se vuelve un insumo esencial para diluir la cerveza.

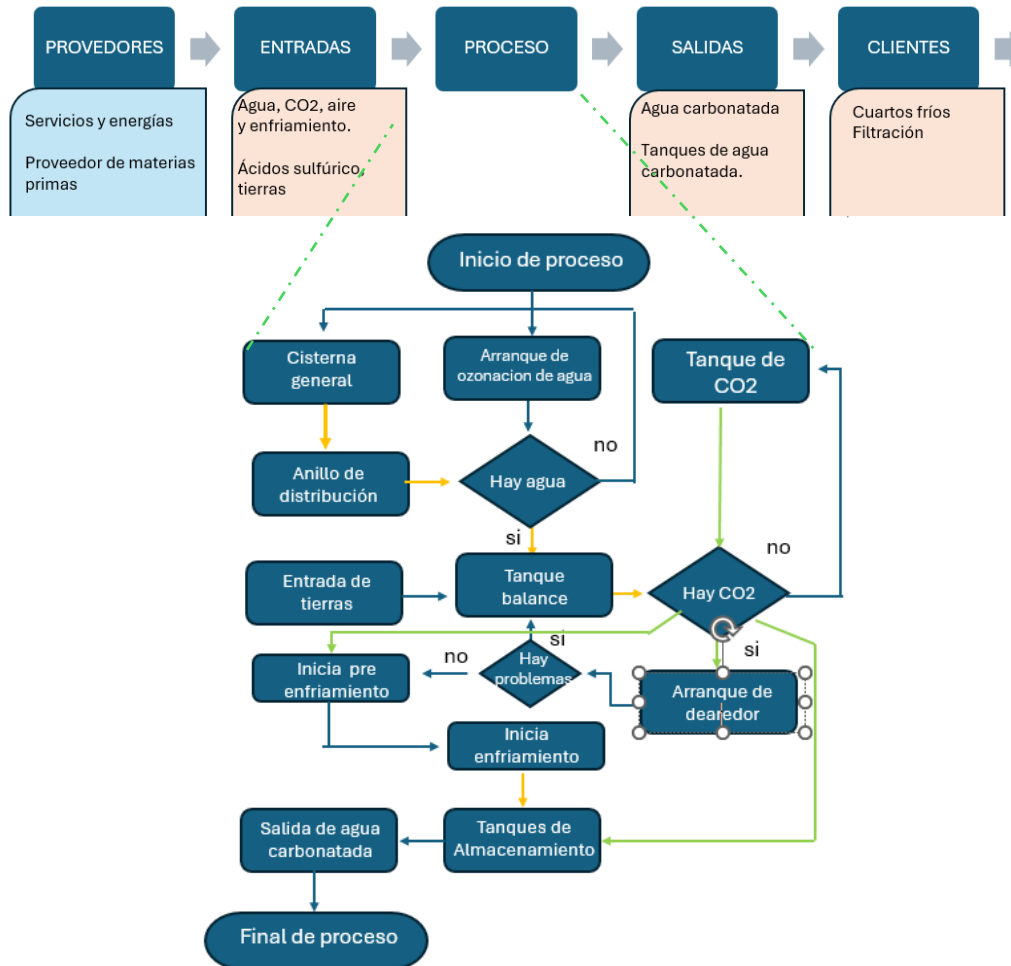


Figura 44. Diagrama SIPOC sobre el tratamiento de agua para su carbonatación.

Nota: Fuente, elaboración propia.

A continuación, comparto detalles clave del proceso:

- El agua debe estar previamente tratada para eliminar minerales, microorganismos, de acuerdo con las especificaciones del producto final.
- La temperatura del agua se reduce a 10 °C para maximizar la solubilidad del CO₂.
- Se emplean sistemas de inyección directa (en línea) o difusores en tanque, controlados
- En cerveza: nivel bajo a medio (1.5–2.5 volúmenes de CO₂).

3.2.1 EVALUACION DEL PROCEDIMIENTO PARA DETERMINAR VOLUMEN DE CO₂ EN LA CARBONATACION DE AGUA.

En el muestreo ejecutado se tomó la presión de servicio de CO₂ inicial de 3.8 kg/cm², con ello se evaluó y dio seguimiento a la variable porcentaje de concentración de CO₂ que controla el operador de dicha área, la cual es importante para considerar línea base actual.

La toma de tiempos de la prueba se dividió en cuatro partes como se muestra a continuación:

- Número de tanques que son llenados con agua carbonatada.
- Número de sistemas de carbonatación de agua que están trabajando.
- Cantidad de ppm de O₂ que contiene el agua carbonatada.
- Volumen concentrado de CO₂ que contiene el agua carbonatada.

Para obtener una muestra representativa y obtener mejores resultados en el análisis de la prueba se decidió contabilizar las veces que se muestra el concentrado de CO₂ y las horas en el que se corre la rutina tomando los respectivos datos como presión de servicio de CO₂ general y en cada punto de servicio de acuerdo con el diagrama de flujo, esta medición fue durante un turno completo de 8 horas durante 1 semana y nos arrojó la muestra siguiente:

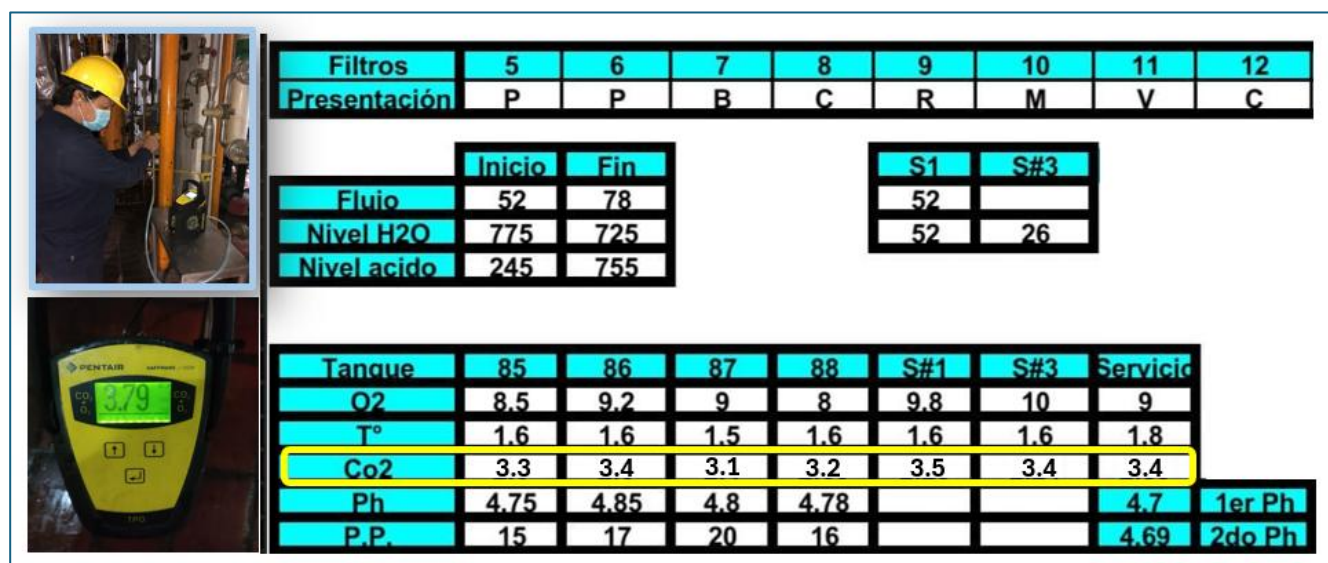


Figura 45. Registro de trazabilidad de contenido de CO₂ en la carbonatación del agua.

Nota: Fuente, elaboración propia.

Después de determinar el uso y la demanda de CO₂ para este proceso, podemos decir que no se debe escatimar la concentración de CO₂, esto puede afectar directamente al área de filtración de cerveza, de manera que en la fase: Análisis comprenderemos el proceso para identificar la causa raíz por el cual es alto el consumo de CO₂.

Tabla 9. Registro de factor de consumo de CO₂ en el área de carbonatación de agua.

Bitacora de consumo de CO ₂ para carbonatar agua						Bitacora de consumo de CO ₂ para carbonatar agua					
Día	Turno	Consumo CO ₂ Kg	Volumen de agua	KPI Actual	KPI Meta	Día	Turno	Consumo CO ₂ Kg	Volumen de agua	KPI Actual	KPI Meta
01/03/2023	1ro	4,162	3,953.20	1.05	0.5	08/03/2023	1ro	3,581	2,890.00	1.24	0.5
	2do	3,910	3,511.80	1.11	0.5		2do	4,889	4,062.00	1.20	0.5
	3ro	3,071	2,898.00	1.06	0.5		3ro	1,479	1,054.96	1.40	0.5
02/03/2023	1ro	3,870	5,065.49	0.76	0.5	09/03/2023	1ro	2,452	1,403.04	1.75	0.5
	2do	3,720	4,724.00	0.79	0.5		2do	887	483.00	1.84	0.5
	3ro	3,265	3,718.00	0.88	0.5		3ro	4,644	2,589.16	1.79	0.5
03/03/2023	1ro	4,254	5,065.49	0.84	0.5	10/03/2023	1ro	4,462	3,347.84	1.33	0.5
	2do	3,836	3,924.34	0.98	0.5		2do	4,261	2,526.00	1.69	0.5
	3ro	5,073	5,025.00	1.01	0.5		3ro	3,450	2,166.69	1.59	0.5
04/03/2023	1ro	4,493	5,678.75	0.79	0.5	11/03/2023	1ro	4,330	2,647.31	1.64	0.5
	2do	4,308	5,316.25	0.81	0.5		2do	3,016	1,710.00	1.76	0.5
	3ro	3,485	4,628.44	0.75	0.5		3ro	4,683	2,576.10	1.82	0.5
05/03/2023	1ro	6,805	4,671.56	1.46	0.5	12/03/2023	1ro	4,973	2,693.90	1.85	0.5
	2do	4,620	2,742.00	1.68	0.5		2do	3,097	3,420.30	0.91	0.5
	3ro	1,083	542.98	1.99	0.5		3ro	4,251	4,189.70	1.01	0.5
06/03/2023	1ro	804	435.02	1.85	0.5	13/03/2023	1ro	4,028	4,798.00	0.84	0.5
	2do	3,216	2,007.00	1.60	0.5		2do	2,846	5,820.70	0.49	0.5
	3ro	4,967	2,819.50	1.76	0.5		3ro	6,004	3,177.30	1.89	0.5
07/03/2023	1ro	3,512	3,478.50	1.01	0.5	14/03/2023	1ro	6,004	4,008.00	1.50	0.5
	2do	3,389	5,503.00	0.62	0.5		2do	2,474	3,406.00	0.73	0.5
	3ro	2,761	3,542.00	0.78	0.5		3ro	2,303	2,760.00	0.83	0.5

Nota: Fuente, elaboración propia.

En la tabla anterior notamos la tendencia consumo alto en la inyección de CO₂ para este proceso, la presión de servicio es regulada a la llegada de los sistemas a 5 kg/cm², esto nos dice que para para carbonatar el agua para proceso se requieren hasta 1.6 unidades de CO₂ cuando la relación debería ser menor a 0.5 unidades de CO₂ por cada hectolitro de agua, de acuerdo con la Figura 45.

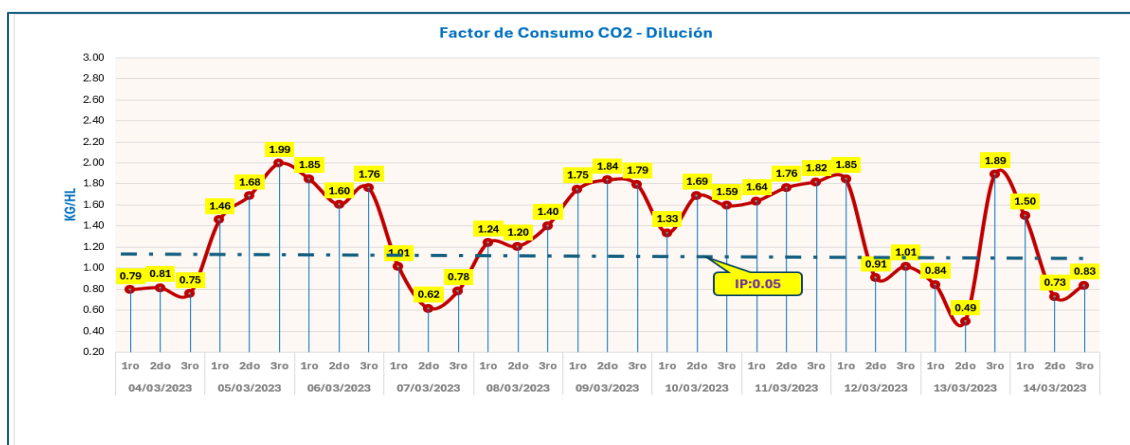


Figura 46. tendencia sobre el factor de consumo de CO₂ en la carbonatación del agua.

De acuerdo con los datos presentados en la Figura 46, se identifica un consumo excesivo de CO₂ durante la carbonatación del agua, evidenciado por una concentración promedio de 3.4% la cual supera el rango óptimo establecido (2.5–3%).

Esta desviación genera:

- Incremento innecesario en costos operativos (20 a 30% de sobreconsumo).
- Riesgo potencial en calidad (afectación de perfil sensorial si >3%).
- Ineficiencia en el proceso (mayor inyección forzada de CO₂ y tiempos de contacto agua-CO₂ más prolongados).

3.3 USO DE CO₂: AREA FILTRACIÓN DE CERVEZA

Con el mapa SIPOC tenemos un panorama más claro sobre el proceso de la utilización del CO₂ para diluir y filtrar la cerveza en el área de cuartos fríos, destacando el rol del CO₂ para desplazar oxígeno, prevenir oxidación, conservar el sabor y mantener la carbonatación deseada en la cerveza terminada.

este diagrama permite identificar entradas, responsables, y salidas críticas, asegurando que el proceso cumpla con los estándares de calidad exigidos por la industria cervecera.

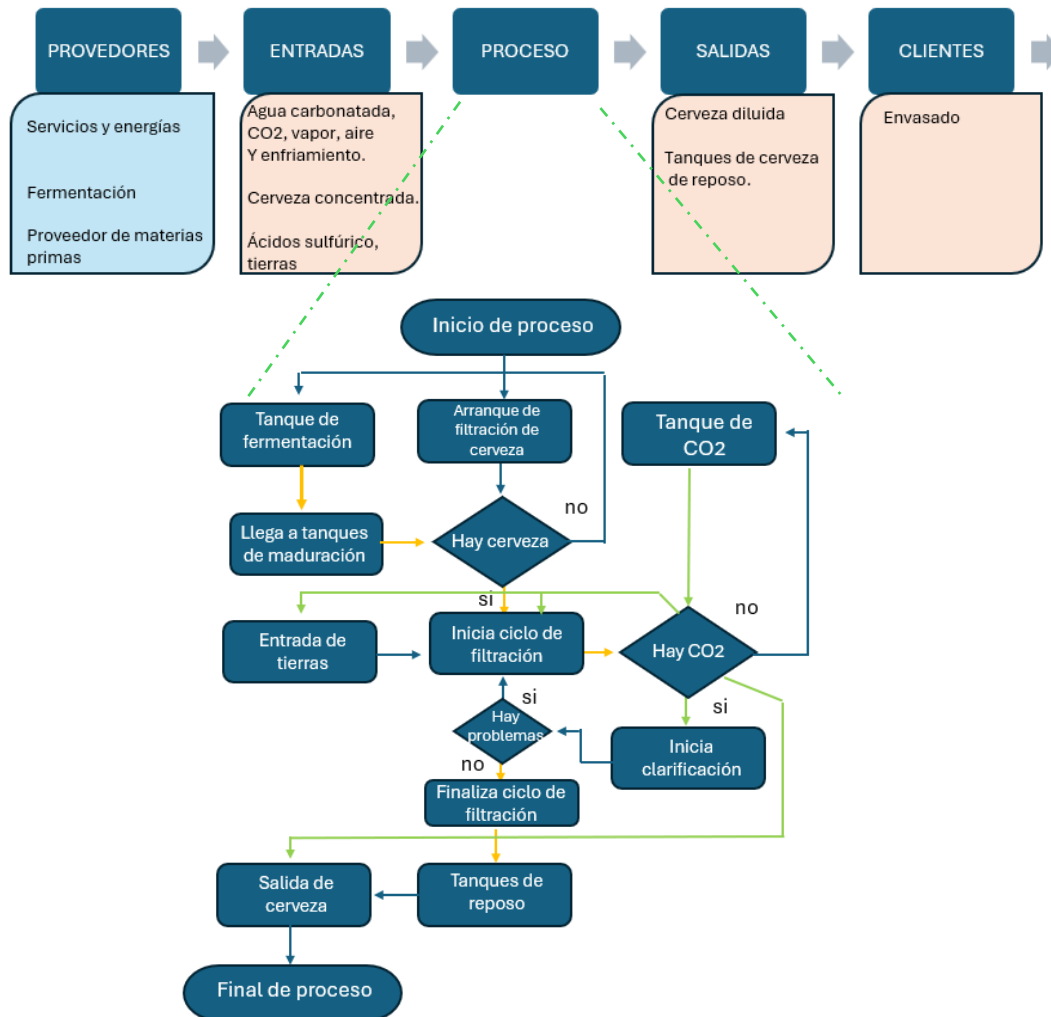


Figura 47. Diagrama SIPOC sobre la carbonatación en el proceso de filtración de cerveza.

Nota: Fuente, elaboración propia.

A continuación, comparto detalles clave del proceso:

- Oxígeno disuelto (DO): debe mantenerse 9 ppb para evitar envejecimiento prematuro.
- Presión de CO₂: ajustada para mantener el equilibrio en cada transferencia.
- Temperatura: 0–2 °C para preservar CO₂ disuelto y evitar pérdidas.
- Preserva características sensoriales: aroma, fresca, sabor.

3.3.1 EVALUACION DEL PROCEDIMIENTO PARA DETERMINAR VOLUMEN DE CO₂ EN LA CARBONATACION EN LA FILTRACIÓN DE CERVEZA

Con el muestreo ejecutado se tomó la presión de servicio de CO₂ inicial de 5.2 kg/cm², a través vez de ello se evaluó y se dio seguimiento a la variable porcentaje de concentración de CO₂ para la carbonatación de filtración de cerveza que controla el operador, la cual es importante para considerar línea base actual.

La toma de tiempos de la prueba se dividió en cuatro partes como se muestra a continuación:

- Número de filtros que son llenados con agua carbonatada y elementos filtrantes.
- Número de tanques de reposo con cerveza diluida que se carbonata.
- Volumen concentrado de CO₂ que contiene la cerveza filtrada.

Para obtener una muestra representativa y obtener mejores resultados en el análisis de la prueba se decidió contabilizar las veces que se muestra el concentrado de CO₂ y las horas en el que se corre la rutina tomando los respectivos datos como presión de servicio de CO₂ general y en cada punto de servicio de acuerdo con el diagrama de flujo, esta medición fue durante un turno completo de 8 horas durante 1 semana obteniendo la muestra siguiente:

Tabla 10. Registro de contenido de CO₂ en la etapa de filtración de cerveza.

DEPARTAMENTO DE ELABORACION SECCION CUARTOS FRIOS									
DATOS DE PROCESO									
Serie de reposo	P	pH	SRM	Alcohol Vol	EMO	YDK's	IBU	CO ₂	fecha
482, 483, 484	4.1	4.16	5.17	7.29	17.32	32.04	30.43	3.4	3/3/2023
168, 172	4.32	4.2	5.29	7.25	17.44	26.76	29.15	3.5	3/3/2023
184 al 192	4.51	4.11	4.96	7.16	17.45	38.04	28.98	3.7	3/3/2023
236 al 244	4.47	4.16	4.78	7.19	17.46	37.99	30.96	3.4	3/3/2023
06, 407, 409, 410, 411, 412	4.38	4.15	16.02	7.13	17.28	43.56	32.89	3.5	3/3/2023
414 al 419	4.56	4.27	16.04	7.04	17.29	44.7	32.07	3.4	3/3/2023
460 al 465	4.22	4.12	15.79	6.98	16.89	36.65	30.47	3.3	3/3/2023
245, 247, 248, 249	4.68	4.09	8.5	7.12	17.53	40.86	29.73	3.1	3/3/2023
211, 213, 215	4.61	4.1	7.92	7.06	17.38	42.1	31.97	3.4	3/3/2023
207, 209	4.62	4.04	7.99	7.29	17.78	40.29	31.3	4.1	3/3/2023
81, 82	3.69	4.09	7.14	7.54	17.36	45.22 no ok	34.05	3.5	3/3/2023
237 al 243	3.76	4.07	6.28	7.48	17.32	30.2	29.06	3.1	3/3/2023

Nota: Fuente, elaboración propia.

Después de determinar el uso y la demanda de CO₂ para este proceso, podemos decir que el área de filtración de cerveza no presta atención a la alta concentración de CO₂ a pesar de que este sea catalogado como atributo de calidad, al ser critico en este proceso puede afectar directamente al envasar la cerveza, de manera que en la fase: Análisis comprenderemos más a fondo la causa raíz por el cual es alto el consumo de CO₂.

Tabla 11. Registro de factor de consumo de CO₂ en el área de filtración de cerveza.

Bitacora de consumo de CO2 para filtrar cerveza						Bitacora de consumo de CO2 para filtrar cerveza					
Dia	Turno	Consumo CO2 Kg	Cerveza Filtrada HL	KPI Actual	KPI Meta	Dia	Turno	Consumo CO2 Kg	Cerveza Filtrada HL	KPI Actual	KPI Meta
01/03/2023	1ro	12,892	6,204.00	2.08	1.02	08/03/2023	1ro	14,520	7,135.00	2.04	1.02
	2do	17,080	8,455.00	2.02	1.02		2do	10,151	5,645.00	1.80	1.02
	3ro	16,281	8,695.00	1.87	1.02		3ro	11,861	6,134.00	1.93	1.02
02/03/2023	1ro	12,326	6,150.00	2.00	1.02	09/03/2023	1ro	14,687	7,035.00	2.09	1.02
	2do	11,539	6,213.00	1.86	1.02		2do	16,300	7,395.00	2.20	1.02
	3ro	12,504	6,370.00	1.96	1.02		3ro	19,889	8,635.00	2.30	1.02
03/03/2023	1ro	11,438	6,143.00	1.86	1.02	10/03/2023	1ro	18,155	8,573.33	2.12	1.02
	2do	9,451	6,089.00	1.55	1.02		2do	17,538	8,893.33	1.97	1.02
	3ro	11,548	6,066.00	1.90	1.02		3ro	16,175	7,576.33	2.13	1.02
04/03/2023	1ro	14,568	9,970.00	1.46	1.02	11/03/2023	1ro	12,372	6,918.33	1.79	1.02
	2do	18,344	10,220.00	1.79	1.02		2do	15,028	7,594.33	1.98	1.02
	3ro	13,954	9,592.00	1.45	1.02		3ro	15,715	7,894.33	1.99	1.02
05/03/2023	1ro	17,306	10,165.00	1.70	1.02	12/03/2023	1ro	14,718	11,103.33	1.33	1.02
	2do	14,802	9,534.00	1.55	1.02		2do	10,952	11,103.33	0.99	1.02
	3ro	13,769	9,403.33	1.46	1.02		3ro	13,534	11,103.33	1.22	1.02
06/03/2023	1ro	12,096	7,351.67	1.65	1.02	13/03/2023	1ro	16,093	11,555.00	1.39	1.02
	2do	14,728	8,416.67	1.75	1.02		2do	15,585	11,555.00	1.35	1.02
	3ro	15,175	9,016.67	1.68	1.02		3ro	15,949	11,555.00	1.38	1.02
07/03/2023	1ro	9,516	6,630.00	1.44	1.02	14/03/2023	1ro	14,138	18,080.00	0.78	1.02
	2do	10,132	8,103.00	1.25	1.02		2do	11,426	18,080.00	0.63	1.02
	3ro	12,109	8,600.00	1.41	1.02		3ro	13,158	18,080.00	0.73	1.02

En la tabla anterior, notamos la tendencia consumo alto en la inyección de CO₂ para este proceso, la presión servicio es regulado a la llegada de los sistemas a 5.2 kg/cm², esto nos dice que para para carbonatar la cerveza filtrada se requiere hasta 2.1 unidades de CO₂ cuando la relación debería ser menor a 1.02 unidades de CO₂ por cada hectolitro de cerveza filtrada, como se muestra a continuación.

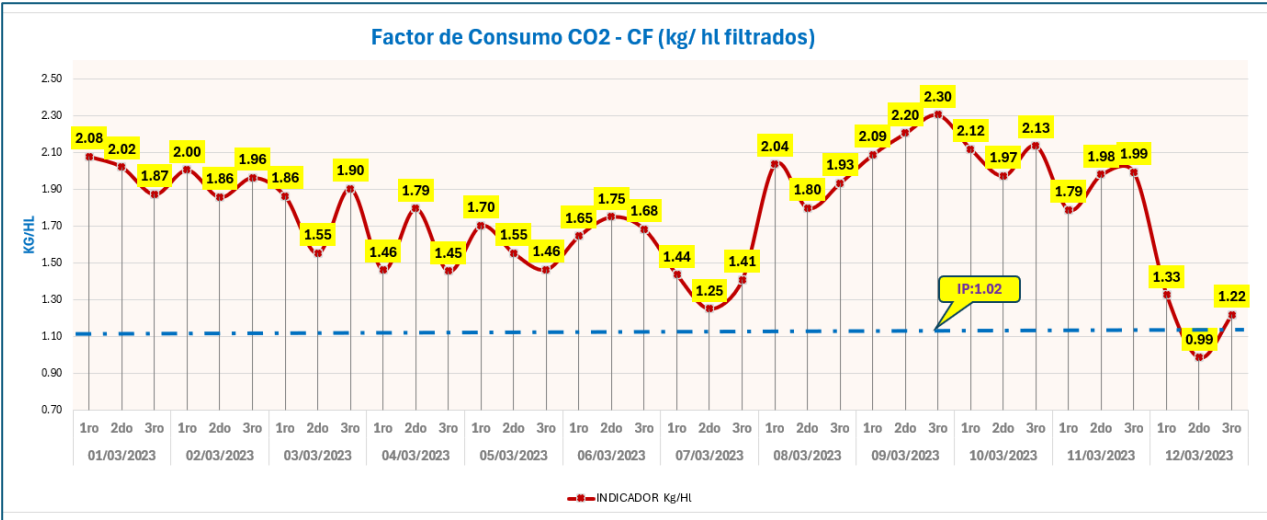


Figura 48. Tendencia de facto de consumo de CO₂ en la etapa de filtración de cerveza.

Nota: Fuente, elaboración propia.

Como podemos observar en Figura 48, el factor de consumo de CO₂ está muy por arriba de la relación que debe utilizar para carbonatar la cerveza filtrada, esto nos dice que se obtiene un resultado arriba de 3.3% de volumen concentrado de CO₂ al tratarse de una concentración alta, esto quiere decir que el consumo de CO₂ también es proporcional, el rango de concentración de CO₂ que debe estar de 2.5 a 3% convirtiéndose en un área de oportunidad.

3.4 USO DE CO₂ EN EL ENVASADO DE CERVEZA.

Con el mapa SIPOC tenemos un panorama más claro sobre el proceso de la utilización del CO₂ para envasar la cerveza en sus diferentes presentaciones en el área de embotellado, destacando la importancia del CO₂ para preservar y conservar el sabor en la cerveza terminada.

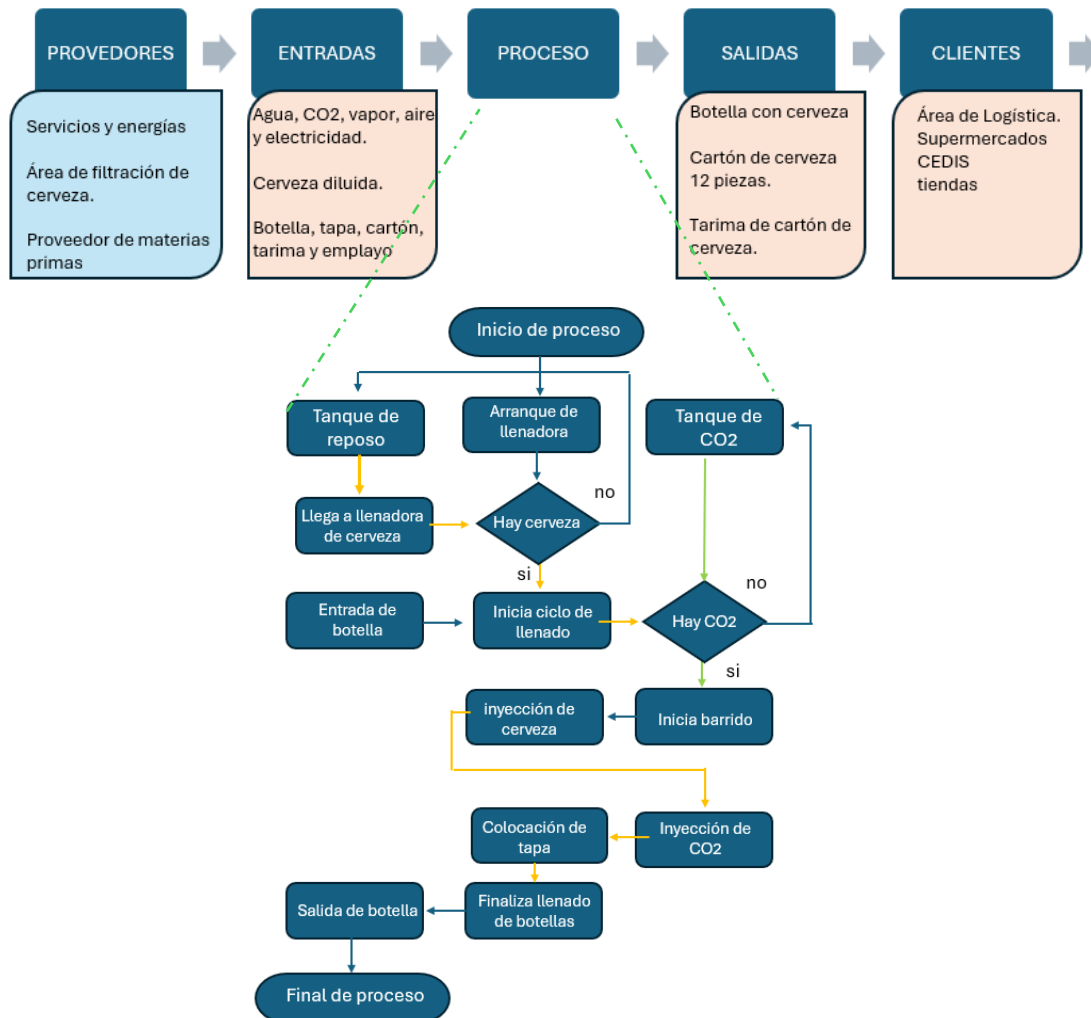


Figura 49. Diagrama SIPOC sobre la carbonatación en el proceso de envasado de cerveza.

Nota: Fuente, elaboración propia.

A continuación, comparto detalles clave del proceso:

- El oxígeno disuelto debe mantenerse por debajo de 10 ppb para evitar oxidación.
- La presión de CO₂ en la llenadora debe estar ajustada a la presión de saturación (1.8–2.5 kg/cm² a 0–2 °C).
- La temperatura de cerveza debe estar entre 0 y 2 °C, para el mantener el equilibrio del CO₂ disuelto.
- Prolonga la vida útil de la frescura.
- Conserva el perfil sensorial original (sabor, aroma, cuerpo).

55

Tabla 12. Registro de factor de consumo de CO₂ en el área de envasado de cerveza

Bitacora de consumo de CO2 para envasar cerveza						Bitacora de consumo de CO2 para envasar cerveza					
Dia	Turno	Consumo CO2 Kg	Cerveza env HL	KPI Actual	KPI Meta	Dia	Turno	Consumo CO2 Kg	Cerveza env HL	KPI Actual	KPI Meta
01/03/2023	1ro	10,169	8,035.00	1.27	1.05	08/03/2023	1ro	9,360	6,099.33	1.53	1.05
	2do	8,156	7,961.00	1.02	1.05		2do	10,255	6,715.33	1.53	1.05
	3ro	6,705	7,358.00	0.91	1.05		3ro	9,260	6,099.33	1.52	1.05
02/03/2023	1ro	9,278	6,760.00	1.37	1.05	09/03/2023	1ro	11,076	8,052.67	1.38	1.05
	2do	7,084	5,436.00	1.30	1.05		2do	9,848	7,549.67	1.30	1.05
	3ro	8,914	6,537.00	1.36	1.05		3ro	11,965	8,249.67	1.45	1.05
03/03/2023	1ro	8,406	6,129.00	1.37	1.05	10/03/2023	1ro	7,110	7,835.00	0.91	1.05
	2do	9,012	5,943.00	1.52	1.05		2do	5,201	7,009.00	0.74	1.05
	3ro	10,277	6,226.00	1.65	1.05		3ro	8,703	8,221.00	1.06	1.05
04/03/2023	1ro	13,896	9,374.67	1.48	1.05	11/03/2023	1ro	13,530	8,269.67	1.64	1.05
	2do	16,654	10,300.67	1.62	1.05		2do	14,907	8,793.67	1.70	1.05
	3ro	14,897	10,106.67	1.47	1.05		3ro	11,974	7,979.67	1.50	1.05
05/03/2023	1ro	10,678	9,608.67	1.11	1.05	12/03/2023	1ro	11,445	10,749.33	1.06	1.05
	2do	11,727	9,840.67	1.19	1.05		2do	10,236	10,749.33	0.95	1.05
	3ro	11,748	9,652.67	1.22	1.05		3ro	9,602	10,749.33	0.89	1.05
06/03/2023	1ro	13,815	8,757.67	1.58	1.05	13/03/2023	1ro	9,848	10,690.33	0.92	1.05
	2do	12,757	8,089.67	1.58	1.05		2do	7,584	10,690.33	0.71	1.05
	3ro	13,189	7,937.67	1.66	1.05		3ro	8,708	10,690.33	0.81	1.05
07/03/2023	1ro	10,825	8,662.67	1.25	1.05	14/03/2023	1ro	9,298	5,604.00	1.66	1.05
	2do	9,410	7,340.67	1.28	1.05		2do	9,808	5,604.00	1.75	1.05
	3ro	9,163	7,329.67	1.25	1.05		3ro	9,579	5,604.00	1.71	1.05

Nota: Fuente, elaboración propia.

En la Figura 50, se muestra la tendencia consumo alto de CO₂ manteniendo un volumen por arriba de 3% CO₂, como lo muestra la Tabla 12, esto nos dice que por cada hectolitro de cerveza envasada requiere más 1.7 unidades de CO₂, cuando la referencia nos dice que la relación debe ser 1.02; Algunos factores que implica el consumó sea alto se deben a:

- Factor de consumo depende de la línea y tipo de presentación que se esté envasado, ya que existen tipo bote, botella chica, mediana y barril.
- Modulación de líneas de producción.
- Micro fugas en llenadoras de las líneas de producción.

A partir de ello, se comienza a prestar más atención a través de seguimiento de un diagrama de control para observar las desviaciones; Las micro fugas pueden generar un daño hacia la salud ya que implica operar la maquina todo el turno con esa exposición con el CO₂.

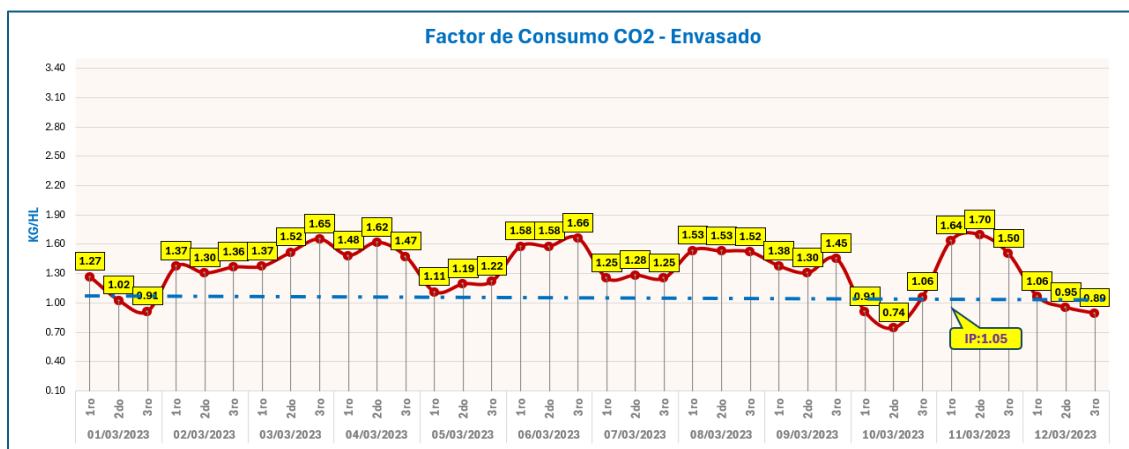


Figura 51. Tendencia de facto de consumo de CO₂ en la etapa de filtración de cerveza.

Nota: Fuente, elaboración propia.

Como podemos observar en la Figura 51, el consumo de CO₂ está muy por arriba de la relación debe ser 1:1 para envasar la cerveza, convirtiéndose en un área de oportunidad que analizare más adelante.

CONCLUSIÓN

A partir del levantamiento realizado en las áreas de filtración y envasado de cerveza, se identificó un sobreconsumo significativo de CO₂, evidenciado por los registros de consumo específicos comparados con los parámetros de volumen de este insumo en la cerveza como se vio en el desarrollo de este capítulo. Este sobreconsumo representa no solo un desperdicio de recurso, sino también un incremento en los costos operativos además de incluir compras de CO₂ a proveedores externos como se aprecia en la Figura 53.

En el área de filtración, se detectaron fugas en las líneas de CO₂, así como una operación ineficiente de los sistemas de presurización durante el barrido de tanques y desplazamiento de oxígeno. Por su parte, en el área de envasado, el consumo elevado se relaciona principalmente con configuraciones no óptimas de los sistemas de hermeticidad en su ciclo de llenado y purgado de botella, así como con fugas no detectadas en válvulas y conexiones teniendo como consecuencias alta concentración de dióxido de carbono que se percibe en entorno de las áreas como fermentación, filtración y envasado de cerveza generando un potencial impacto ambiental negativo por ende el factor de uso de CO₂ está muy por encima de la línea base establecida tal como se muestra en la Figura 52.

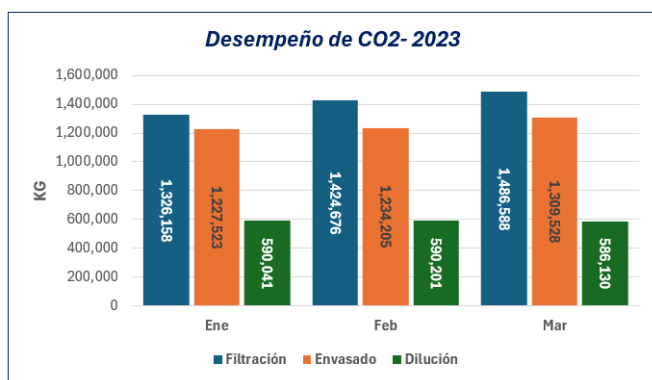


Figura 53. Cantidad de CO₂ utilizado en la cervecería.
Nota: Fuente, elaboración propia.

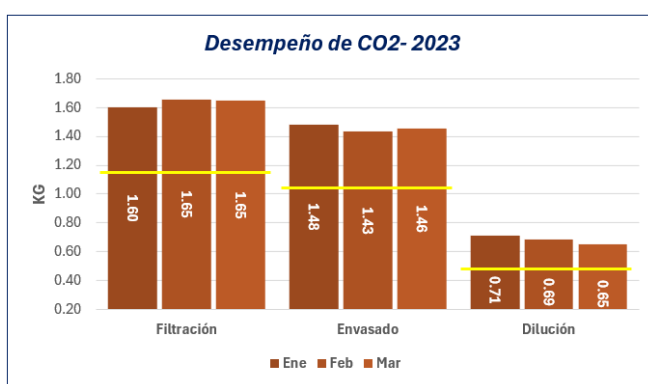


Figura 52. Factor de consumo de CO₂.
Nota: Fuente, elaboración propia.

4. FASE ANALIZAR: GESTIÓN Y APLICACIÓN DE USO DE CO₂ EN LAS ÁREAS PRODUCTIVAS

4.1 ANÁLISIS DEL SISTEMA DE RECUPERACIÓN DE CO₂ EN EL ÁREA DE FERMENTACIÓN.

En la operación actual del departamento de Energías y Fluidos (E&F), se ha identificado un problema recurrente relacionado al bajo cumplimiento de la meta recuperación de CO₂ diaria, Esta situación provoca una pérdida significativa del gas generado durante la fase de alta fermentación, impactando directamente la eficiencia de su operación, junto con el equipo de trabajo de fermentación, E&F y su servidor que funge como moderador, realizamos el análisis sobre la situación actual.

Se seleccionó la herramienta de análisis de causa-raíz debido a su eficacia para identificar de manera estructurada y sistemática las causas fundamentales del problema operativo. En este caso, buscamos identificar las causas técnicas y operativas, determinar si existen factores externos o de diseño propiamente del proceso.

Ante este escenario, se considera crítico implementar una herramienta de análisis con el diagrama de Ishikawa (causa-efecto), con el objetivo de mejorar la eficiencia operativa de recuperación de CO₂, alineándose con los principios de mejora continua, sostenibilidad y eficiencia energética en la planta cervecera.

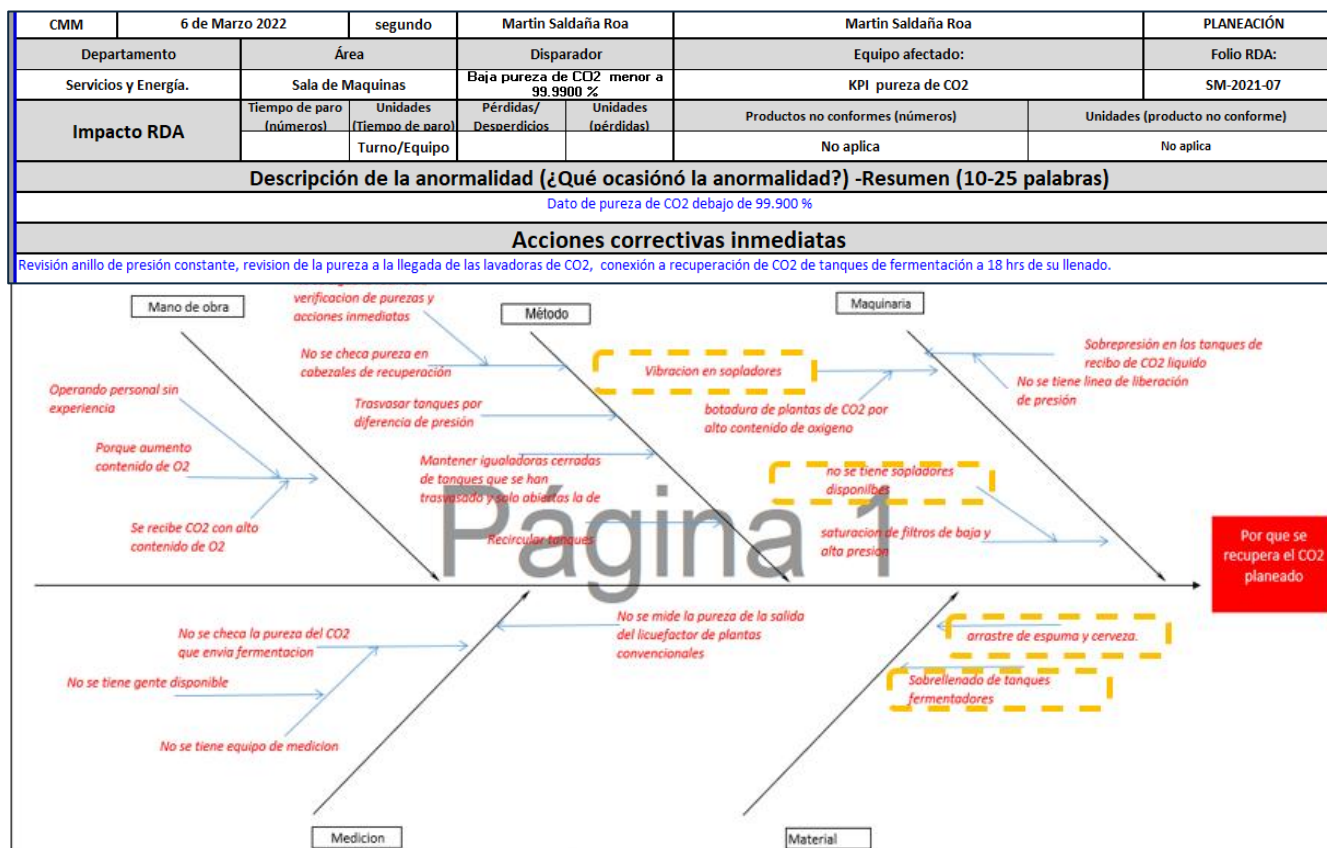


Figura 54. Diagrama de Ishikawa elaborado por el equipo de E&F.

Análisis (5 Por Qué's)					
Título: Déficit en la recuperación de CO2					
Equipo: Operadores de plantas de CO2			Área: Energías & fluidos		
Fenómeno: Baja recuperación de CO2 durante el proceso de captación de CO2 de baja pureza.					
1er Por qué	2do Por qué	3er Por qué	4to Por qué	5to Por qué	Contramedidas
Porque se dañan los sopladores	Porque presentan vibración en rodamientos	Porque hay apelmazamiento de caramelo	Porque hay regreso de cerveza en la trampa de espuma	Porque sobrellenan los tanques fermentadores	Validar existencia de disponibilidad de fermentadores
Porque no se recupera el CO2 planeado	Porque no llega suficiente flujo de CO2	Porque no se conectan los tanques fermentadores	Porque se conecto después de la hora oportuna		Revisar procedimiento de conexión por parte del área de fermentación.
	Porque se contamina el CO2 que se recupera	Porque algunos tanques están dirigidos hacia el venteo	Porque se conectan antes de tiempo		Estandarizar tiempos de conexión por parte de fermentación

Figura 55. Análisis de causa raíz para analizar el alto consumo de CO₂.

Con base al análisis, se identificó el área de oportunidad que se encuentra en el tiempo de conexión de los fermentadores (cierre de la válvula de venteo hacia la atmósfera y apertura de la válvula de recuperación), como se observó en la fase de Definir; tenemos claro que la capacidad instalada no está aprovechada al 100%, por lo que trabajaremos en esto para el sistema de recuperación sea eficiente el volumen de captación de CO₂ para ello necesitamos garantizar la disponibilidad de equipo.

4.2 ANÁLISIS SOBRE LA CARBONATACIÓN DEL AGUA PARA PARA DILUIR CERVEZA CONCENTRADA.

En el proceso de carbonatación de agua con CO₂, se ha detectado un consumo superior, el cual no se refleja como una mejora en la calidad del producto final ni en una mayor eficiencia del proceso. Esta desviación representa un uso ineficiente de recursos, con impactos tanto económicos, junto con el equipo del departamento de Energías y Fluidos (E&F) y su servidor que funge como moderador, realizamos el análisis sobre la problemática como se muestra a continuación.

Análisis (5 Por Qué's)					
Título: Alto consumo de CO2 en agua carbonatada					
Equipo: Operadores E&F			Área: Energías & fluidos		
Fenómeno: Alto consumo de CO2 durante el proceso carbonatación de agua.					
1er Por qué	2do Por qué	3er Por qué	4to Por qué	5to Por qué	Contramedidas
Porque es necesita desarear el agua	Porque cuando se libera el oxigeno también se libera CO2	Porque al hacer el barrido de oxigeno el agua se carbonata	Porque implica más del 60% de utilización de CO2		Validar otras opciones para no desperdiciar CO2 de alta pureza

Figura 56. Análisis de 5W, alto consumo de CO₂ en el agua carbonatada.

El proceso de carbonatación de agua tiene como objetivo saturar el agua desaireada con dióxido de carbono hasta alcanzar niveles específicos de carbonatación, que posteriormente se utilizan para diluir la cerveza. Un consumo elevado de CO₂ sin mejora proporcional en la concentración final indica una ineficiencia operativa.

A continuación, se describen las causas técnicas y operativas que explican este sobreconsumo:

- En ocasiones los operadores realizan ajustes en los setpoints de dosificación de CO₂, que causan una sobredosificación donde se trabajan 2 o hasta 3 sistemas de carbonatación ya que los tiempos de respuesta a veces son lentos ya que el punto de muestreo es hasta el llenado de tanque de almacenamiento.
- Operadores pueden activar manualmente la inyección de CO₂ en los tanques de almacenamiento de agua, generando variabilidad en el consumo.

4.3 ANÁLISIS SOBRE EL USO Y APLICACIÓN DE CO₂ PARA LA FILTRACIÓN DE CERVEZA.

En la etapa de filtración de cerveza, se utilizan sistemas presurizados que emplean CO₂ para evitar la oxidación del producto. Además, puede haber una compensación de carbonatación final antes de pasar al área de envasado. Sin embargo, se ha detectado un consumo excesivo de CO₂ en esta etapa, lo que representa un uso ineficiente del insumo, en conjunto con el equipo del departamento de Energías y Fluidos (E&F), cuartos fríos y su servidor que funge como moderador, realizamos el análisis sobre esta area de oportunidad:

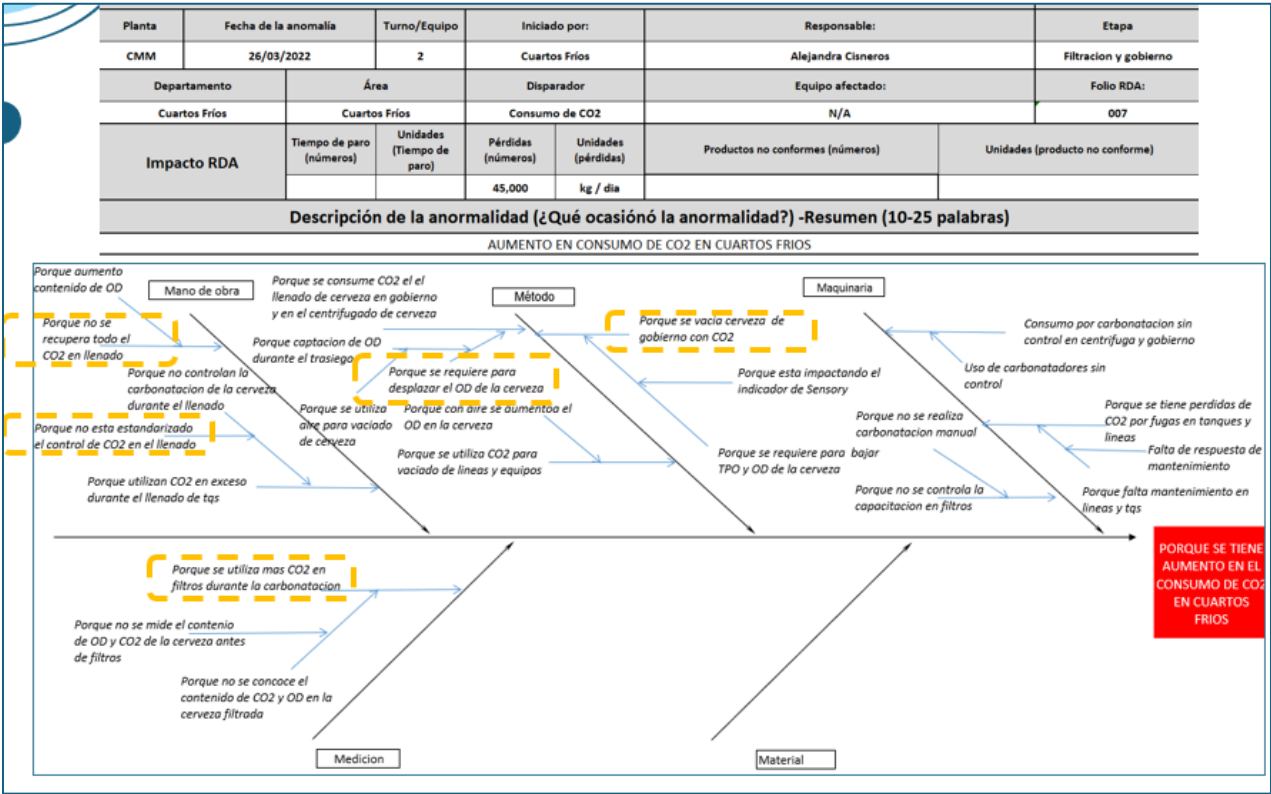


Figura 57. Diagrama de Ishikawa elaborado por el equipo de Cuartos Fríos.

A continuación, se describen las causas técnicas y operativas que explican este sobreconsumo:

- En ocasiones los operadores del área de filtros realizan algunos ajustes finos de carbonatación para controlar el oxígeno disuelto, mejorar atributo de brillo y textura que causan una sobredosificación algunas veces los tiempos de respuesta a veces son lentos.
- Operadores pueden activar manualmente la inyección de CO₂ en los tanques de reposo de cerveza para mantener la carbonatación activa, generando variabilidad en el consumo.
- Micro fugas de CO₂ en tuberías, válvulas y conexiones que no siempre son detectadas visualmente, pero causan pérdidas continuas, especialmente en líneas que permanecen en presión durante turnos largos.

4.4 ANÁLISIS SOBRE EL USO Y APLICACIÓN DE CO₂ PARA ENVASAR DE CERVEZA

En la etapa de envasado de cerveza, el dióxido de carbono (CO₂) se utiliza principalmente para inertizar los envases desplazando el oxígeno, sin embargo, un consumo excesivo de este insumo representa ineficiencias técnicas en el proceso, generando pérdidas económicas que deben ser corregidas, en conjunto con el equipo del departamento de Energías y Fluidos (E&F), envasado y su servidor que funge como moderador, realizamos el análisis sobre la problemática como se muestra a continuación.

Análisis (5 Por Qué's)					
Título: Alto consumo de CO2 en envasado					
Equipo: Operadores de llenadoras			Area: Envasado		
Fenómeno: Alto consumo de CO2 durante el proceso de llenado de cerveza.					
1er Por qué	2do Por qué	3er Por qué	4to Por qué	5to Por qué	Contramedidas
Porque es necesaria el cambio de atmosfera	Porque cuando se libera el oxígeno también se libera CO2	Porque al hacer el barrido válvulas juromatic no sellan	Porque no se corren las pruebas estanqueidad en llenadoras		Validar en campo las pruebas de estanqueidad en llenadoras de cerveza

Figura 58. Análisis de 5W analizar el alto consumo de CO₂ en el envasado de cerveza.

Se determina en conjunto con el equipo de envasado, que las pruebas de estanqueidad no se hacen de manera efectiva y frecuentemente, esto origina que exista micro fugas de CO₂ en as llenadoras de envasado.

Analizando el otro esquema, en el muestreo evaluado en campo, se notó que en ocasiones la cerveza tenía alta concentración de CO₂, al momento de pasar por la llenadora se sobre presurizaba la botella, después de que pasaba por el pasteurizador, las botellas explotaban por lo que el contenido de CO₂ es un punto crítico de control.

ÁREA: ENVASADO		Línea: BARRILES		Equipo / TANQUE 303 DE Maquina: GOBIERNO		☒ Operación ☒ Calidad ☐ Mantenimiento	
Descripción de la Anormalidad				☒ Repetitivo ☐ Un evento		Efecto de la anomalía	
SE DETECTA CO2 ALTO 2.92, 2.99 % AL CAMBIO DE PRESENTACIÓN				Producto		NEGRA MODELO 59 L	
				Pérdidas		112 BARRILES	
				Tiempo perdido:		60	
Operador:				Equipo de reemplazo:			
Acción Correctiva							
SE DETIENE PROCESO Y SE NOTIFICA AL ING. RUBEN ALCANTARA DE CUARTOS FRIOS PARA VERIFICAR EL TANQUE 303 EN LA DETERMINACIÓN SE TIENE VALOR DE 2.94 % EN EL PUNTO DE MUESTREO DEL TANQUE. SE RECIRCULA EL TANQUE Y SE OBTIENE VALOR DE 3.50% SE REINICIA PRODUCCIÓN.							
Observaciones							
SE REVISAR EL CAMBIO DE PRESENTACIÓN A LAS 13:00 Y SE INICIÓ PRODUCCIÓN DESPUES DEL CAMBIO A LAS 11:40							
Análisis de Causa							
Participantes		Mateo Gutierrez, Gabriel Mendoza; Ruben Alcantara					
1		¿Por qué? NO SE DETERMINA CO2 AL REINICIO DE PRODUCCIÓN					
2		¿Por qué? SE DETECTA CO2 ALTO AL CAMBIO DE PRESENTACIÓN					
3		¿Por qué? SE TIENE CONTENIDO DE CO2 ALTO EN EL TANQUE 303 DE GOBIERNO 3.64 %					
4		¿Por qué? NO SE DETERMINA CO2 ADECUADAMENTE EN EL TANQUE 303 AL INICIO DEPRODUCCIÓN SE OBTIENE LECTURA DE 3.5 %					
5		¿Por qué?					
Procedimiento de Operación Estándar				Resultado del Análisis			
Documento en el lugar: ☒ Si ☐ No Se necesita crear: ☐ Si ☐ No		Está actualizado: ☐ Si ☐ No Requiere actualización: ☐ Si ☐ No		Se está ejecutando: ☐ Si ☒ No Se requiere capacitación: ☐ Si ☐ No		Se conoce la causa de la anomalía: ☒ Si ☐ No	
#	Fecha	Tema	Acción	Comentarios	Responsable	Fecha de vencimiento	Estatus
1	8-Mar-23	CONTENIDO DE CO2 ALTO EN TANQUE DE GOBIERNO	VERIFICAR CO2 PREVIO A REALIZAR CAMBIO DE TANQUE A BARRILES	EL VALOR QUE SE TENIA DE CO2 DE LIBERACIÓN ES DE 2.8 %	Ruben Alcantara	8-Mar-23	Completa
2	8-Mar-23	REVISION DE LA METODOLOGIA PARA LIBERACION DE TANQUE EN GOBIERNO	REVISAR CAPACITACION DE PERSONAL QUE DETERMINA CO2 EN GOBIERNO		Oscar Pedraza	8-Mar-23	Completa
3	8-Mar-23	NOTIFICAR A CALIDAD ANTES DE REALIZAR CAMBIO DE PRESENTACIÓN Y TANQUE	AVISAR A CALIDAD ANTES DE REINICIAR PRODUCCIÓN DESPUES DE CAMBIO DE PRESENTACIÓN	NOTIFICAR ANTES DEL CAMBIO A CALIDAD (revisar SOP)	Mateo Gutierrez	8-Mar-23	Completa
4	8-Mar-23	VERIFICACION DE CALIDAD AL INICIO DE PROCESO Y CAMBIO DE TANQUE	ACUDIR AL CAMBIO DE PRESENTACIÓN Y DETERMINAR CARACTERISTICAS INICIALES	SE NOTIFICA ANTES DEL CAMBIO ASR PROD	Gabriel Mendoza	8-Mar-23	Completa
5	8-Mar-23	REINICIAR PRODUCCIÓN HASTA QUE SE LIBERE PRODUCTO POR PARTE DE ACA	LLENAR PRIMERAS MUESTRAS DESPUES DEL CAMBIO Y ESPERAR DETERMINACIÓN		Mateo Gutierrez	8-Mar-23	Completa

Figura 59. Análisis de 5W analizar concentración alta de CO₂ en la cerveza que se envía al área de embotellado.

A continuación, se describen las causas técnicas y operativas que explican este sobreconsumo:

- Como se explicaba en bloque de filtración de cerveza, algunos operadores pueden activar manualmente la inyección de CO₂ en los tanques de reposo de cerveza para mantener la carbonatación activa, esto trae repercusión cuando la realiza el barrido a la botella, riesgo de abombado de botella.
- Micro fugas de CO₂ en tuberías, válvulas y conexiones que no siempre son detectadas visualmente, pero causan pérdidas continuas, especialmente en líneas que permanecen en presión durante turnos largos.

5. FASE MEJORAR: INCREMENTO EN LA TASA DE RECUPERACIÓN Y USO DE CO₂

5.1 CONTRAMEDIDAS DEL 5 POR QUÉS EN EL AREA DE FERMENTACIÓN

Con el análisis, identificamos las contramedidas que están relacionadas con el déficit de recuperación de CO₂, las cuales son:

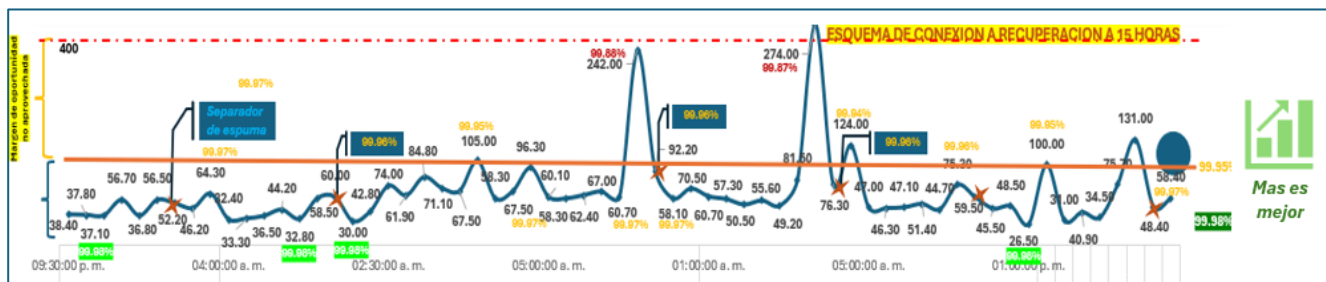
- Llevar a condición base los sopladores a través de mantenimiento predictivo dando seguimiento a la vibración, ya que se convierte en cuello de botella para los compresores de CO₂.
- Operadores del departamento de Energías y Fluidos (E&F) asistirán al separador de espuma al inicio y final de cada turno para validar si existe excedente de cerveza, de ser así notificar de inmediato para revisar niveles de tanques fermentadores.
- Al momento de recibir un alto contenido de ppm de O₂, revisar directamente que salón presenta esa desviación para evitar una sobre contaminación.
- Realizamos una propuesta para determinar el punto óptimo de recuperación de CO₂, sin llegar al punto de contaminación en el tren de purificación, lograr con esto agilizar el proceso de captación y con esto disminuir los tiempos de conexión de los fermentadores (cierre de la válvula de venteo hacia la atmósfera y apertura de la válvula de recuperación).

5.1.1 MEJORA EN LA EFICIENCIA DE RECUPERACIÓN DE CO₂ EN EL ÁREA DE FERMENTACIÓN.

Para que se obtuviera una cantidad de muestra representativa y recibir mejores resultados en el análisis para correr las pruebas, se decidió contabilizar el tiempo fermentación actual de un tanque fermentador después de su llenado cerrando la válvula de la línea de recuperación y abriendo la válvula de venteo y después de que se cumpliera la condición de 18 horas de fermentación se opta por hacer la conexión de recuperación de CO₂ cerrando la válvula de venteo y abriendo hacia la línea recuperación, la serie de tanques fermentadores que llegan a la fila y que son atendidos, tarda un lapso de 10 minutos por series de tanques, esto durante cuatro horas seguidas en los horarios del turno matutino y vespertino en una semana.

Identificamos que hay una brecha significativa del margen actual de recuperación, como lo podemos ver en la Figura 60, solo tenemos 33 ppm actuales en promedio, lo que podemos llevar hasta 400 ppm que es lo que tenemos permitido según el fabricante para compresores con “stripper”, esto nos dice que el número de series de tanques fermentadores que van conectándose son constantes y que podemos reducir el tiempo de conexión de manera significativa.

Comenzamos con la siguiente fase de la prueba en la que se reduce el tiempo de conexión de los tanques fermentadores (cierre de la válvula de venteo hacia la atmósfera y apertura de la válvula de recuperación) a 15 horas, por lo que es importante revisar los puntos de color rojo denominado como punto de muestreo.



En la Figura 60, notamos algunos picos importantes a considerar en algunos salones de fermentación a partir de ello debemos controlar el proceso para evitar una contaminación en el tren de purificación, las series de tanques llegan a la fila son las mismas, transcurren lapso de 15 horas, resultado significativo.

En la Figura 61, notamos picos a considerar, ya que estamos en cerca del límite central, en este punto es crucial definir los tiempos de conexión de las series de tanque de los salones, a partir de ello, debemos analizar el comportamiento en el tren de purificación de CO₂ y la capacidad instalada ya que recordemos que tenemos plantas de CO₂ que pueden tratar hasta 100 ppm, recibiendo actualmente 72 ppm O₂ con 12 horas de conexión de los tanques fermentadores.

5.1.2 ESTANDARIZACIÓN PROCEDIMIENTO PARA CONEXIÓN DE TANQUES FERMENTADORES HACIA LA RECUPERACIÓN

La estandarización es un tema fundamental en cada organización porque favorece y facilita el uso de documentos y equipos, lo que propongo es lo siguiente:

- Implementar el procedimiento para determinar de manera adecuada la pureza de CO₂
- Implementar un “*poka yoke*” para determinar si fue analizado con el fin de eliminar errores al momento de correr las primeras validaciones de la trazabilidad de pureza de CO₂.
- Implementar como control visual las listas de fermentadores llenados con cerveza, esto para agilizar la conexión hacia la línea de recuperación (cerrar válvula de venteo y abrir la válvula de recuperación hacia el cabezal principal).

Tabla 13. Bitácora de control de recuperación de CO₂ después de implementar la mejora.

	Fecha	Produccion de								Plan - [Kg]	Produccion Real [Kg]	GAP [Kg]	Valor medio en compresion [Kg/h]
		Mosto (hL) Real	1° Dia	2° Dia	3° Dia	4° Dia	5° Dia	6° Dia	7° Dia				
jue	8/6	14,667	4,870	18,183	25,711	19,562	8,909	3,856	2,110	83,202	99,671	16,469	3,467
vie	9/6	14,481	3,382	26,104	34,810	19,888	9,229	3,764	2,335	99,513	105,152	5,639	4,146
sáb	10/6	16,192	8,989	27,439	35,215	25,013	11,087	5,204	2,365	115,313	120,339	5,026	4,805
dom	11/6	17,876	11,324	27,373	29,975	18,472	7,673	4,308	1,181	100,306	100,358	52	4,179
lun	12/6	24,306	12,034	33,476	36,628	27,582	10,993	5,949	2,352	129,013	131,594	2,581	5,376
jue	13/6	28,944	12,671	28,462	39,205	24,866	19,439	7,268	3,280	135,191	135,733	542	5,633
vie	14/6	25,574	9,870	30,927	40,264	28,913	12,873	5,963	2,797	131,607	132,624	1,017	5,484
sáb	15/6	23,675	10,842	31,814	39,911	27,847	12,252	5,876	2,532	131,074	139,408	8,334	5,461
dom	16/6	19,948	14,175	28,716	28,300	22,443	15,375	4,283	2,592	115,885	118,683	2,798	4,829
lun	17/6	14,057	12,641	20,618	34,522	26,358	7,057	3,578	1,334	106,108	110,247	4,139	4,421
mar	18/6	9,410	3,382	26,104	24,810	29,888	9,229	3,764	2,335	99,513	110,811	11,298	4,146
mié	19/6	10,347	1,381	20,670	28,320	35,543	7,352	2,817	1,977	98,059	102,375	4,316	4,086
jue	20/6	16,192	8,989	27,439	35,215	25,013	11,087	5,204	2,365	115,313	126,939	11,626	4,805
vie	21/6	18,551	10,632	27,287	41,316	20,220	8,593	4,540	1,506	114,093	121,503	7,410	4,754

Con estos resultados el departamento de Energías y Fluidos (E&F) fue capaz de aumentar el stock de CO₂ de alta pureza sin llegar a comprometer la calidad del CO₂, ya que como podemos ver la Tabla 13, está cerca del límite central, ya que si sube mucho el contenido de O₂ se corre el riesgo de contaminar el volumen de captación con baja pureza en los deorizadores de plantas convencionales, esto implicó una efectiva reducción efectiva del 33% en los tiempos de conexión de los tanques fermentadores en 33% logrando aumentar el volumen de recuperación.

5.1.3 DETERMINACION DE CONTROLES VISUALES PARA EL AREA DE FERMENTACIÓN

Los controles visuales generalmente son un apoyo para tener el área organizada y con esto asegurar que el personal sea más eficiente, con este análisis nos percatamos de que es necesario colocar controles visuales en:

- ✓ Tanques fermentadores, cuenten con puerto de muestro y manómetro.
- ✓ Tarjetas para llevar control de estatus de horas que ha transcurrido la fermentación
- ✓ Medidor de pureza de CO₂ en cada cabezal.

Con todas las propuestas de mejora ya mencionadas daremos solución a los tiempos de espera que son el objetivo de este caso de estudio es importante que fermentación y el

departamento E&F conozcan la bitácora de conexión de tanques fermentadores como se muestra en la Tabla 14 para validar comportamiento de la pureza de CO₂ que reciben, es necesario mantener estas mejoras por lo cual pasaremos a la fase de control.

Tabla 14. Bitácora de control de conexión de fermentadores hacia recuperación.

Fecha de conexión	Unitanque	Hora de conexión	Volumen de Mosto (hL) Real	°P Extrato Inicial Real	°P Final de Fermentación	Tipo de Fermentador [Normal] [Propagador] [Krausen]	Termino de llenado Fecha y hora	Tiempo para conectar a recuperación
23/03/2023	101	17:20:00	610	17.90	4.30	NORMAL	23/06/2023 07:20	10:00:00
23/03/2023	171	17:20:00	610	17.90	4.30	NORMAL	23/06/2023 07:20	10:00:00
24/03/2023	196	0:15:00	600	17.90	4.30	NORMAL	23/06/2023 14:15	10:00:00
24/03/2023	258	0:15:00	600	17.90	4.30	NORMAL	23/06/2023 14:15	10:00:00
24/03/2023	259	0:15:00	600	17.90	4.30	NORMAL	23/06/2023 14:15	10:00:00
24/03/2023	257	0:15:00	600	17.90	4.30	NORMAL	23/06/2023 14:15	10:00:00
24/03/2023	253	0:15:00	600	17.90	4.30	NORMAL	23/06/2023 14:15	10:00:00
24/03/2023	211	0:15:00	600	17.90	4.30	NORMAL	23/06/2023 14:15	10:00:00
24/03/2023	206	0:15:00	600	17.90	4.30	NORMAL	23/06/2023 14:15	10:00:00
24/03/2023	215	0:15:00	600	17.90	4.30	NORMAL	23/06/2023 14:15	10:00:00
24/03/2023	226	0:15:00	600	17.90	4.30	NORMAL	23/06/2023 14:15	10:00:00
24/03/2023	103	1:00:00	600	17.90	4.30	NORMAL	23/06/2023 15:00	10:00:00
24/03/2023	124	1:00:00	600	17.90	4.30	NORMAL	23/06/2023 15:00	10:00:00

5.1.4 CONCLUSIÓN SOBRE LA MEJORA DE LA RECUPERACION DE CO₂

Con estos resultados del departamento de Energías y Fluidos (E&F) aumento el stock de CO₂ de alta pureza, para mantener estos resultados, es importante estandarizar el proceso de captación, esto implica hacer un plan de trabajo para validar los tiempos de conexión de los fermentadores (cierre de la válvula de venteo hacia la atmósfera y apertura de la válvula de recuperación) para sostener lo todo lo que se implementó para la mejora a través de una rutina.

Con base a ello, notamos una tasa de ocupación de 100% en la utilización de las plantas de CO₂ tipo convencional y tipo “stripper”, ya que los resultados con la corrida actual de 12 horas (antes 18 horas) fueron favorables, a pesar de contar con días con baja recuperación relativamente por la caída del efecto de la campana de gauss, tal como se muestra en la tabla 11, el impacto fue mínimo ya que la utilización se mantiene al 62% de la utilización de equipos (antes 32% utilización).

Tabla 15. Disponibilidad de equipo de recuperación.

Capacidad instalada				
Clase	Plantas CO ₂	Pureza min	KG/H	KG/Día
streaper	P1	98%	1,000	24,000
Convencional	P2	99.95%	500	12,000
Convencional	P3	99.95%	500	12,000
Convencional	P4	99.95%	500	12,000
Convencional	P5	99.95%	500	12,000
Convencional	P6	99.95%	500	12,000
streaper	P7	98%	2,000	48,000
			5,500	132,000

5.2 CONTRAMEDIDAS DEL 5 POR QUÉS DEL AREA DE CARBONATACION DE AGUA

Con el análisis, identificamos las contramedidas que están relacionadas con uso de CO₂, las cuales son:

- Analizar posible alternativa para liberar una línea de inyección de CO₂ a través de las líneas de venteo que tiene el tren de purificación de CO₂.
- Operadores del departamento de filtración de cerveza se comprometen a regular la presión de servicio de CO₂, sin descuidar la concentración de CO₂ de 2.5% que establece la norma de aseguramiento de calidad.
- Al momento de reducir el flujo de CO₂, cuidar el contenido de ppm de O₂, revisar directamente la operación y de ser necesario regresar a las condiciones habituales.

5.2.1 MEJORA EN EL USO DE CO₂ PARA LA CARBONACIÓN DE AGUA PARA PROCESO.

En la siguiente Figura 56, hacemos uso de la tubería conocida como línea igualadora de presión en el que el CO₂ en estado gaseoso no se logra condensar ya que para trasvasar el CO₂ liquido se hace por diferencial de presión entre el licuefactor y el tanque receptor que es se denominado tanque CO₂, se pone en servicio una línea alterna que conectara directamente con el deareador como se aprecia de lado derecho.

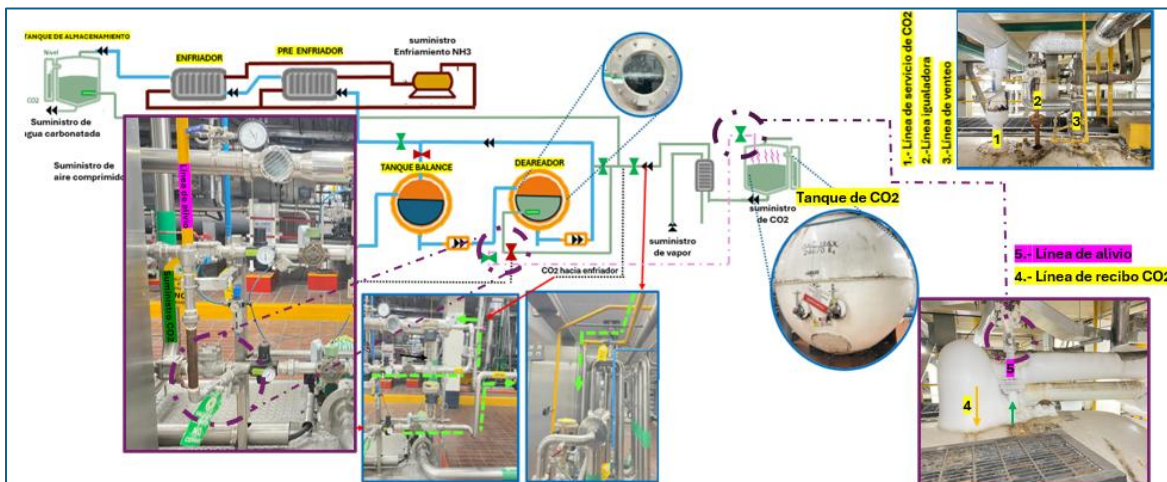


Figura 63. Conexión de línea igualadora del tanque de CO₂ hacia deareador de sistemas de carbonatación de agua.

5.2.2 MEJORA EN LA PRUEBA DE DETERMINACION DE VOLUMEN DE CO₂ EN LA CARBONATACION DE AGUA.

En la Figura 63, podemos observar la nueva distribución de CO₂ como uso alterno, ya que esto ayudará a reducir el consumo directo de CO₂ de alta pureza, los resultados solidos apalancan el trabajo en equipo que desarrollo el personal del departamento de Energías y Fluidos (E&F):

- ✓ Control de presión solamente para los carbonatadores para enfriador y tanques de almacenamiento final de agua carbonatada llevándolo a 2.2 kg/cm².

- ✓ Control en la línea de alivio del tanque recibidor de CO₂ en vez de regresar al mismo sistema de purificación de CO₂, se lleva directamente hacia el deareador.
- ✓ Control equilibrado de ppm O₂ vs porcentaje de volumen de CO₂.

Tabla 16. Bitácora de control de contenido de CO₂ la carbonatación de agua.

Filtros	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Presentación	P	P	B	C	R	M	V	C	C
	Inicio	Fin			S1	S#3	S4		
Flujo	52	78			S2		15600		
Nivel H2O	775	725			S2	26			
Nivel ácido	245	755							
Tanque	85	86	87	88	S#1	S#3	Servicio		
O2	8.5	9.2	9	8	9.8	10	9		
T°	1.6	1.6	1.5	1.6	1.6	1.6	1.8		
Co2	2.6	2.3	2.4	2.68	2.28	2.24	2.53		
Ph	4.75	4.85	4.8	4.78			4.7	1er Ph	
P.P	15	17	20	16			4.69	2do Ph	

Resultados anteriores



Resultado de la modulación vol CO2



Con estos resultados el equipo de Energías & Fluidos es capaz de aumentar el stock de CO₂ de alta pureza ya que la línea igualadora presentó resultados positivos, este primer paso es clave para reducir el uso de CO₂.

Tabla 17. Factor de consumo de CO₂ para carbonatación de agua.

Bitacora de consumo de CO2 para carbonatada agua						Bitacora de consumo de CO2 para carbonatada agua					
Dia	Turno	Consumo CO2 Kg	Volumen de agua	KPI Actual	KPI Meta	Dia	Turno	Consumo CO2 Kg	Volumen de agua	KPI Actual	KPI Meta
01/06/2023	1ro	2,113	3,953.20	0.53	0.5	08/06/2023	1ro	2,059	2,890.00	0.71	0.5
	2do	2,011	3,511.80	0.57	0.5		2do	1,789	4,062.00	0.44	0.5
	3ro	2,271	2,898.00	0.78	0.5		3ro	879	1,054.96	0.83	0.5
02/06/2023	1ro	2,365	5,065.49	0.47	0.5	09/06/2023	1ro	1,280	2,403.04	0.53	0.5
	2do	2,120	4,724.00	0.45	0.5		2do	287	483.00	0.59	0.5
	3ro	3,860	4,918.00	0.78	0.5		3ro	1,643	2,589.16	0.63	0.5
03/06/2023	1ro	2,254	5,065.49	0.44	0.5	10/06/2023	1ro	2,062	3,347.84	0.62	0.5
	2do	2,136	3,924.34	0.54	0.5		2do	2,064	2,526.00	0.82	0.5
	3ro	2,129	5,025.00	0.42	0.5		3ro	1,051	2,166.69	0.49	0.5
04/06/2023	1ro	2,683	5,678.75	0.47	0.5	11/06/2023	1ro	2,014	2,947.31	0.68	0.5
	2do	2,284	5,316.25	0.43	0.5		2do	1,416	2,110.00	0.67	0.5
	3ro	2,060	4,628.44	0.45	0.5		3ro	1,685	2,576.10	0.65	0.5
05/06/2023	1ro	1,805	4,671.56	0.39	0.5	12/06/2023	1ro	1,973	2,693.90	0.73	0.5
	2do	1,124	2,742.00	0.41	0.5		2do	2,097	3,420.30	0.61	0.5
	3ro	285	542.98	0.52	0.5		3ro	4,051	4,889.70	0.83	0.5
06/06/2023	1ro	204	435.02	0.47	0.5	13/06/2023	1ro	3,528	5,298.00	0.67	0.5
	2do	1,206	2,007.00	0.60	0.5		2do	2,846	5,820.70	0.49	0.5
	3ro	2,060	3,819.50	0.54	0.5		3ro	2,004	3,177.30	0.63	0.5
07/06/2023	1ro	1,716	3,478.50	0.49	0.5	14/06/2023	1ro	3,004	4,008.00	0.75	0.5
	2do	2,389	5,503.00	0.43	0.5		2do	1,474	3,406.00	0.43	0.5
	3ro	2,731	4,542.00	0.60	0.5		3ro	2,303	2,760.00	0.83	0.5

Nota: Bitácora de control de contenido de CO₂ en la carbonatación de agua

En la tabla anterior notamos la tendencia de consumo controlado en la inyección de CO₂ para este proceso, la presión de servicio es regulado a la llegada de los sistemas a 2.5 kg/cm², esto nos dice que para para carbonatar el agua para proceso bajo hasta 0.7 unidades de CO₂ (antes 1.6 unidades) cerca de la relación, debiendo ser menor a 0.5 unidades de CO₂ por cada hectolitro de agua, de acuerdo con la Figura 64.

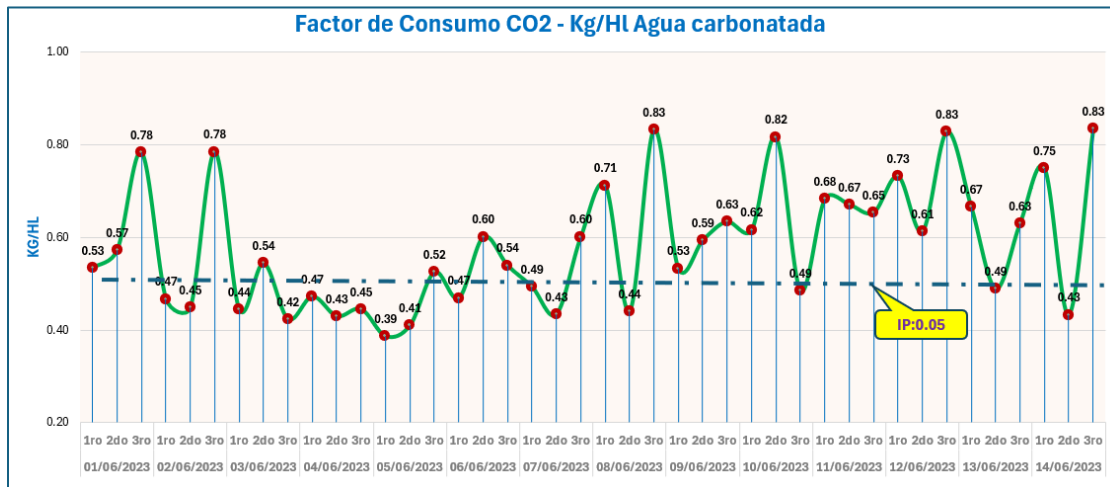


Figura 64. Factor de consumo de CO₂ en la carbonatación de agua.

5.2.3 CONCLUSIÓN SOBRE LA MEJORA DE USO DE CO₂ EN LA CARBONATACION DE AGUA.

La reutilización de excedente de CO₂ que genera la cama de gas en la parte alta del tanque de almacenamiento de CO₂, ayudó a reducir el consumo de CO₂ de alta pureza.

Se nota una mejora en la trazabilidad del valor acumulado diario, ayudando a mejorar el factor de consumo sin mejorar el porcentaje de concentración de CO₂ y sin afectarla calidad de producto.

5.3 CONTRAMEDIDAS DEL 5 POR QUÉS DEL AREA DE FILTRACIÓN DE CERVEZA

Con el análisis, identificamos las contramedidas que están relacionadas con uso de CO₂, las cuales son:

- Instalar control automático de inyección de CO₂ a través de las líneas de venteo que tiene el tren de purificación de CO₂ ya que las que tienen son manuales.
- Operadores del departamento de Energías y Fluidos (E&F) se comprometen a regular la presión de servicio de CO₂ a 3.2 kg/cm², sin descuidar la concentración de CO₂ de 2.5% de acuerdo con normas que es que pide el procedimiento por parte de aseguramiento de calidad.
- Al momento de reducir el flujo de CO₂ cuidar el contenido de ppm de O₂, revisar directamente la operación y de ser necesario regresar a las condiciones habituales.

5.3.1 MEJORA DE USO DE CO₂: AREA FILTRACIÓN DE CERVEZA

Se adjunta evidencia del *Gemba* realizado en el proceso para corroborar dichos sucesos que impactaron de manera positiva el uso de CO₂.



Figura 65. Control de inyección de CO₂ para la filtración de cerveza.

En el recorrido realizado por el área notamos que tienen alta concentración de CO₂ tal como se muestra en la Figura 65, esto da indicios a que hay malas prácticas de operación al comento de correr el proceso de filtración de cerveza, esto puede ser perjudicial a la salud del personal que labora dentro del área.

5.3.2 MEJORA EN LA PRUEBA DE DETERMINACION DE VOLUMEN DE CO₂ EN LA FILTRACIÓN DE CERVEZA

En la Figura 61, podemos observar la nueva distribución de CO₂ como uso alterno, ya que esto ayudará a reducir el consumo directo de CO₂ de alta pureza, los resultados solidos apalancan el trabajo en equipo que desarrolló el personal del departamento de Energías y Fluidos (E&F):

- ✓ Control de presión solamente para los carbonata dores de tierras filtrantes y los filtros de cerveza y tanques de precapa la presión de servicio se llevó de 8 a 5.1 kg/cm².
- ✓ Control en la línea de alivio del tanque recibidor de CO₂ en vez de regresar al mismo sistema de purificación de CO₂, se lleva directamente hacia los tanques de preparación de tierras y tanque de precapa.
- ✓ Control equilibrado de porcentaje de volumen de CO₂.

Serie de reposo	°P	pH	°SRM	Alcohol Vol.	EMO	VDK's	IBU	CO2	fecha
515 al 518	4.56	4.08	5.01	7.02	17.28	31.58	28.57	2.5	11/6/2023
519 al 523	4.62	4.16	5.16	7.12	17.48	28.85	26.54	2.6	12/6/2023
524, 525, 526	4.23	4.19	4.79	7.22	17.31	42.02	29.86	2.7	10/6/2023
498	4.5	4.25	5.34	7.31	17.7	23.2	30	2.6	31/05/2023
500	4.59	4.18	5.12	7.5	18.09	43.8	31	2.5	31/05/2023
510	4.45	4.16	5.28	7.51	17.48	35.5	27.3	2.9	1/6/2023
182	4.43	4.14	5.27	7.37	17.73	29.8	30.3	2.4	5/06/2023
396, 397	4.58	4.28	17.55	7.31	17.76	44.41	37.7	2.4	9/6/2023
399, 400	4.38	4.15	16.49	7.04	17.14	36.56	32.95	2.5	7/6/2023
402 al 405	3.93	4.2	13.69	6.55	15.91	30.49	32.07	2.7	7/6/2023
401	4.18	4.22	15.83	7.34	17.46	35.27	35.4	2.9	12/6/2023
343, 349, 350	4.75	4.09	17.21	7.18	17.71	32.22	34.5	2.35	8/6/2023
455, 456	4.55	4.23	16.27	6.8	16.88	45	38.05	2.4	9/6/2023
457 al 459	4.24	4.16	15.96	7.3	17.45		31.41	2.4	12/6/2023



Figura 66. Bitácora de control de contenido de CO₂ para la filtración de cerveza.

Con estos resultados el personal del departamento de Energías y Fluidos (E&F) es capaz de aumentar el stock de CO₂ de alta pureza, ya que la línea igualadora presento resultados positivos, este primer paso es clave para dar un mejor servicio hacia los clientes internos buscando ser autosuficientes.

Tabla 18. Factor de consumo de CO₂ para la filtración de cerveza.

Bitacora de consumo de CO2 para filtrar cerveza						Bitacora de consumo de CO2 para filtrar cerveza					
Dia	Turno	Consumo CO2 Kg	Cerveza Filtrada HL	KPI Actual	KPI Meta	Dia	Turno	Consumo CO2 Kg	Cerveza Filtrada HL	KPI Actual	KPI Meta
01/06/2023	1ro	9,892	8,200	1.21	1.02	08/06/2023	1ro	11,520	10,177	1.13	1.02
	2do	10,484	12,900	0.81	1.02		2do	9,751	11,135	0.88	1.02
	3ro	11,481	11,675	0.98	1.02		3ro	11,475	11,135	1.03	1.02
02/06/2023	1ro	10,926	9,200	1.19	1.02	09/06/2023	1ro	10,687	10,635	1.00	1.02
	2do	10,500	7,540	1.39	1.02		2do	11,200	10,215	1.10	1.02
	3ro	10,205	6,585	1.55	1.02		3ro	14,090	10,061	1.40	1.02
03/06/2023	1ro	9,237	8,300	1.11	1.02	10/06/2023	1ro	12,172	13,573	0.90	1.02
	2do	6,251	5,140	1.22	1.02		2do	9,538	11,573	0.82	1.02
	3ro	13,598	10,700	1.27	1.02		3ro	10,115	13,573	0.75	1.02
04/06/2023	1ro	11,966	10,950	1.09	1.02	11/06/2023	1ro	10,571	10,993	0.96	1.02
	2do	13,332	11,325	1.18	1.02		2do	11,628	10,998	1.06	1.02
	3ro	13,954	13,575	1.03	1.02		3ro	14,713	10,978	1.34	1.02
05/06/2023	1ro	13,106	10,175	1.29	1.02	12/06/2023	1ro	14,718	11,103	1.33	1.02
	2do	12,802	11,135	1.15	1.02		2do	10,952	11,115	0.99	1.02
	3ro	18,769	12,155	1.54	1.02		3ro	13,534	11,103	1.22	1.02
06/06/2023	1ro	13,993	13,101	1.07	1.02	13/06/2023	1ro	16,093	11,555	1.39	1.02
	2do	13,128	11,216	1.17	1.02		2do	15,585	12,022	1.30	1.02
	3ro	15,175	10,217	1.49	1.02		3ro	15,949	11,501	1.39	1.02
07/06/2023	1ro	15,526	12,630	1.23	1.02	14/06/2023	1ro	14,138	10,080	1.40	1.02
	2do	15,231	12,630	1.21	1.02		2do	11,426	9,080	1.26	1.02
	3ro	11,819	12,630	0.94	1.02		3ro	13,158	10,080	1.31	1.02

Nota: Bitácora de control de contenido de CO₂ para la filtración de cerveza. Fuente elaboración propia, 2023

En la tabla anterior notamos la tendencia consumo controlado en la inyección de CO₂ para carbonatar la cerveza filtrada, la presión del servicio es regulado a la llegada a los filtros con 2.5 kg/cm², esto nos dice que para carbonatar el agua para proceso bajo hasta 1.3 unidades de CO₂ (antes 2.0 unidades) cerca de la relación, debería ser menor a 1.02 unidades de CO₂ por cada hectolitro de cerveza filtrada, de acuerdo con la Figura 67.

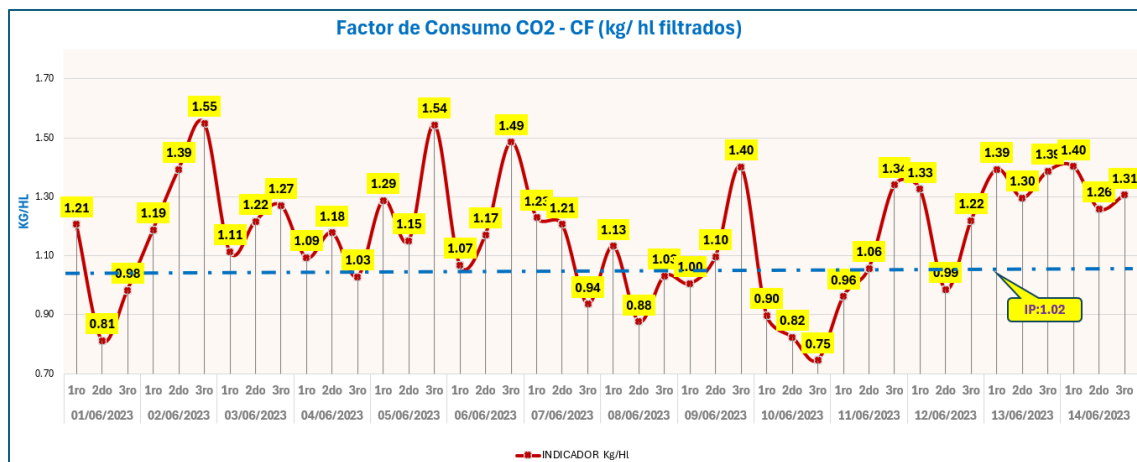


Figura 67. Factor de consumo de CO₂ para la filtración de cerveza.

5.3.3 CONCLUSIÓN SOBRE LA MEJORA DE USO DE CO₂ EN LA FILTRACIÓN DE CERVEZA.

La modulación en cuanto al suministro de CO₂, así como el esfuerzo para implementar controles para regular la inyección de CO₂, fue gracias al compromiso por parte de los operadores, el simple hecho de mantener herméticos sus equipos fue clave para todo esto.

Asimismo, se evidenció una mejora significativa en la trazabilidad del proceso. El monitoreo del valor acumulado diario ha permitido reducir el factor de consumo, controlando el porcentaje de concentración de CO₂ de manera estable sin comprometer la calidad del producto final.

5.4 CONTRAMEDIDAS DEL 5 POR QUÉS DEL AREA DE ENVASADO

Con el análisis, identificamos las contramedidas que están relacionadas con uso de CO₂, las cuales son:

- Auditar pruebas de estanqueidad, hay alto consumo de CO₂ en los tazones de las llenadoras.
- Operadores del departamento de envasado se comprometen a bajar la presión de servicio de CO₂ a 3.2 kg/cm², sin descuidar la concentración de CO₂ de 2.5% de acuerdo con norma de aseguramiento de calidad.
- Al momento de reducir el flujo de CO₂ cuidar el contenido de ppm de O₂, revisar directamente la operación y de ser necesario regresar a las condiciones habituales.

5.4.1 MEJORA DE USO DE CO₂ PARA ENVASADO DE CERVEZA

Como lo mostramos en la fase de análisis, para lograr la reducción de consumo de CO₂ corriendo las pruebas de estanqueidad en el área de envasado era necesario la participación del área de Energías & Fluidos para que la propuesta de mejora sea integral para ambos y que beneficie la problemática que se tiene. se ha ido controlando el consumo de CO₂, así como la concentración en el ambiente de la llenadora sin comprometer la calidad de producto como se mencionaba la fase: Análisis.

PROGRAMA PARA PRUEBA DE ESTANQUEIDAD Y CORRECCION DE FUGAS DE CO2 EN LLENADORAS DE BOTE Y BOTELLA.													
Actividades	Llenadora	Prog. Anual	JULIO				AGOSTO				SEPTIEMBRE		
			29	30	S31	S32	S33	S34	S35	S36	S37	S38	
PRUEBA DE ESTANQUEIDAD, ANTES	LLENADORA "A"	P	-	-	7/31/2022	-	-	-	-	-	-	-	
		R	-	-	7/31/2022	-	-	-	-	-	-	-	
DETECCIÓN DE FUGAS DE CO2, CON ESPUMA		P	-	-	-	-	-	8/16/2022	-	-	-	9/10/2022	
		R	-	-	-	-	-	8/16/2022	-	-	-	9/10/2022	
CORRECCIÓN DE FUGAS DE CO2		P	-	-	-	-	-	17-23 DE AGOSTO	-	-	-	9/11/2022	
		R	-	-	-	-	-	8/18/2022	-	-	-	9/11/2022	
PRUEBA DE ESTANQUEIDAD, DESPUES	LLENADORA "B"	P	-	-	-	-	-	8/24/2022	-	-	-	9/12/2022	
		R	-	-	-	-	-	8/26/2022	-	-	-	9/12/2022	
PRUEBA DE ESTANQUEIDAD, ANTES		P	-	-	7/31/2022	-	-	-	-	-	-	-	
		R	-	-	7/31/2022	-	-	-	-	-	-	-	
DETECCIÓN DE FUGAS DE CO2, CON ESPUMA		P	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
		R	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
CORRECCIÓN DE FUGAS DE CO2	LLENADORA "B"	P	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
		R	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
PRUEBA DE ESTANQUEIDAD, DESPUES		P	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
		R	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
PRUEBA DE ESTANQUEIDAD, ANTES		P	-	-	-	-	-	8/10/2022	-	-	-	-	
		R	-	-	-	-	-	8/12/2022	-	-	-	-	

Figura 68. Programa de gestión de pruebas de estanqueidad para el área de envasado de cerveza.

El rol que desempeñó el personal de E&F fue crucial para validar que en cada arranque y paro de una línea de producción se ejecutaran las pruebas de hermeticidad en las llenadoras, permitiendo un mayor compromiso por parte del área del envasado, ya que es un este procedimiento crucial para la operación de la línea de producción.

Por otro lado, con base en los resultados positivos en las pruebas de hermeticidad en llenadoras, esto es señal de que hay un mejor control en el uso de CO₂, siendo un detonante para comenzar a llevar la trazabilidad de CO₂ las líneas de producción.

Tabla 19. Factor de consumo de CO₂ para el envasado de cerveza.

Bitácora de consumo de CO2 para envasar cerveza						Bitácora de consumo de CO2 para envasar cerveza					
	Turno	Consumo CO2 Kg	Cerveza env HL	KPI Actual	KPI Meta	Día	Turno	Consumo CO2 Kg	Cerveza env HL	KPI Actual	KPI Meta
01/06/2023	1ro	10,171	6,035.00	1.69	1.05	08/06/2023	1ro	8,362	9,899.33	0.84	1.05
	2do	5,986	6,873.00	0.87	1.05		2do	7,258	6,874.33	1.06	1.05
	3ro	6,705	7,254.00	0.92	1.05		3ro	6,840	4,899.33	1.40	1.05
02/06/2023	1ro	6,642	6,860.00	0.97	1.05	09/06/2023	1ro	6,090	5,049.67	1.21	1.05
	2do	6,384	5,416.00	1.18	1.05		2do	6,848	6,051.67	1.13	1.05
	3ro	6,414	7,537.00	0.85	1.05		3ro	4,765	5,049.67	0.94	1.05
03/06/2023	1ro	7,907	8,309.00	0.95	1.05	10/06/2023	1ro	5,322	5,419.00	0.98	1.05
	2do	8,012	8,940.00	0.90	1.05		2do	7,301	8,419.00	0.87	1.05
	3ro	9,282	9,040.00	1.03	1.05		3ro	6,705	6,221.00	1.08	1.05
04/06/2023	1ro	9,696	11,306.67	0.86	1.05	11/06/2023	1ro	9,394	9,969.67	0.94	1.05
	2do	10,854	11,315.67	0.96	1.05		2do	10,920	9,941.67	1.10	1.05
	3ro	10,064	11,389.67	0.88	1.05		3ro	11,774	9,954.67	1.18	1.05
05/06/2023	1ro	12,678	9,728.67	1.30	1.05	12/06/2023	1ro	11,445	10,721.33	1.07	1.05
	2do	11,767	9,751.67	1.21	1.05		2do	10,236	10,798.33	0.95	1.05
	3ro	12,747	9,728.67	1.31	1.05		3ro	9,602	10,788.33	0.89	1.05
06/06/2023	1ro	12,815	12,537.67	1.02	1.05	13/06/2023	1ro	9,848	10,780.33	0.91	1.05
	2do	12,957	12,578.67	1.03	1.05		2do	7,584	7,690.33	0.99	1.05
	3ro	12,928	12,537.67	1.03	1.05		3ro	8,708	9,690.33	0.90	1.05
07/06/2023	1ro	12,648	11,380.67	1.11	1.05	14/06/2023	1ro	9,298	9,662.00	0.96	1.05
	2do	10,810	11,378.67	0.95	1.05		2do	9,808	7,612.00	1.29	1.05
	3ro	9,163	11,380.67	0.81	1.05		3ro	9,579	8,604.00	1.11	1.05

Nota: Bitácora de control de contenido de CO₂ para la envasar cerveza, Fuente elaboración propia, 2023.

El seguimiento oportuno para ir bajando la presión de servicio de CO₂ de manera gradual ha favorecido para controlar la inyección de CO₂ en el tazón de las llenadoras de envasado de cerveza, de igual forma, se realizan rutinas para medir la concentración de CO₂ que puede haber en la atmosfera y también se controló de manera considerable. Asimismo, es importante controlar la hermeticidad en puntos de sujeción que fueron clave para mejorar el consumo.

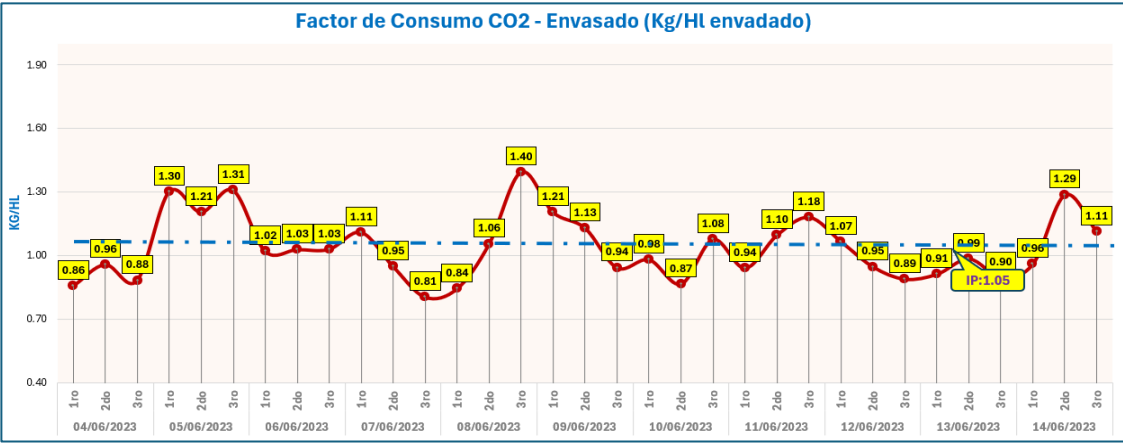


Figura 69. Factor de consumo de CO₂ para envasar cerveza.

6. FASE CONTROL: USO EFICIENTE DE CO₂ EN EL PROCESO CERVECERO

6.1 CONTROL EN LA REUTILIZACIÓN DE CO₂ EN EL ÁREA DE FERMENTACIÓN

La propuesta para mantener el control en el proceso de servicio es el siguiente:

- ✓ Involucrar al jefe de turno para mantener el control de las mejoras.
- ✓ Entrenar a los operadores en los nuevos flujos de trabajo.
- ✓ Con la propuesta de recuperación de CO₂ podrán mantener un flujo que favorezca la agilidad del proceso optimo.

Sala	Día	Hora	ppm de O ₂	Pureza	Tanques proxima conexión	Fecha	Hora de llenado	Horas para conexión	Hora de conexión	Status	OBSERVACIONES
Familiar	25/04/23	16:00:00 p. m.	65.4000	99.96878	UTQ I	25/04/23	03:35:00 a. m.	11:00:00	03:35:00 p. m.	PENDIENTE	se corrigen fugas en tqs.143,178
Negra	25/04/23	16:00:00 p. m.	56.6000	99.97298	131	25/04/23	06:10:00 a. m.	11:00:00	05:10:00 p. m.	CONECTADO	
Corona	25/04/23	16:00:00 p. m.	55.6000	99.97346	143	25/04/23	06:10:00 a. m.	11:00:00	05:10:00 p. m.	CONECTADO	
2PA	25/04/23	16:00:00 p. m.	62.6000	99.97012	148	25/04/23	06:10:00 a. m.	11:00:00	05:10:00 p. m.	CONECTADO	
Victoria	25/04/23	16:00:00 p. m.	48.7000	99.97675	155	25/04/23	06:10:00 a. m.	11:00:00	05:10:00 p. m.	CONECTADO	
Anillo del Toluca	25/04/23	16:00:00 p. m.	81.3000	99.96119	178	25/04/23	07:25:00 a. m.	11:00:00	06:25:00 p. m.	CONECTADO	
Separador de espuma planta 4	25/04/23	16:00:00 p. m.	72.7000	99.96530	179	25/04/23	07:25:00 a. m.	11:00:00	06:25:00 p. m.	CONECTADO	
Separador del salon victoria	25/04/23	16:00:00 p. m.	49.0000	99.97661	UTQ F	25/04/23	13:30:00 p. m.	11:00:00	01:30:00 a. m.	PENDIENTE	
Lavadora Pta 4	25/04/23	16:00:00 p. m.	69.1000	99.96702							

Actividades	Responsable	Aprobador	Consultado	Informado
1. Gestionar conexiones de fermentadores	Operador de Fermentación	Supervisor de Fermentación	Jefaturas	Supervisores E&F
2. Determinar pureza de CO ₂ de acuerdo a horas de conexión	Operador de E&F	Supervisores E&F	Supervisor de Fermentación	Operador de Fermentación
3. Realizar pruebas de hermeticidad en fermentadores	Operador de E&F	Jefaturas	Supervisor de E&F	Supervisor de Fermentación
4. Validar la recuperación de CO ₂	Operador de E&F	Supervisores E&F	Operador de Fermentación	Jefaturas
5. Documentar los resultados/Hallazgos	Operador de E&F	Supervisores E&F	Supervisor de Fermentación	Jefaturas

Acciones aplicadas:

- Compartir hallazgos en grupo de trabajo. Cada turno ✓
- Llevar plan de acción derivado a los hallazgos. Semanal ✓
- Compartir evidencia de acciones corregidas. Semanal

Figura 70. Seguimiento oportuno para controlar micro fugas de CO₂ en fermentadores.

El esquema de roles y responsabilidades para ejecutar validaciones por parte del personal del departamento de Energías y Fluidos (E&F) ha sido clave para mantener la mejora, ya que a través de ello se han corregido fugas, además de validaciones de los tanques fermentadores para su recuperación, así como el censo para determinar la pureza de CO₂ y evitar que se cumpla la condición de recuperar a 12 horas.

6.2 CONTROL DE UTILIZACIÓN DE CO₂ PARA LA CARBONACIÓN DE AGUA PARA PROCESO

La propuesta para mantener el control en el proceso de servicio es el siguiente:

- ✓ Involucrar al jefe de turno para mantener el control de las mejoras.
- ✓ Entrenar a los operadores en el nuevo flujo de trabajo en agua carbonatada y plantas de CO₂.
- ✓ Con la propuesta de mejora de CO₂ se podrá mantener un flujo que favorezca la agilidad y aprovechamiento al máximo en el uso de este insumo.

6.3 CONTROL DE UTILIZACIÓN DE CO₂ PARA LA FILTRACIÓN DE CERVEZA.



Figura 71. Seguimiento oportuno para controlar micro fugas de CO₂ el área de filtración de cerveza.

El esquema de roles y responsabilidades para ejecutar validaciones por el personal del departamento de Energías y Fluidos (E&F) ha sido clave para mantener la mejora ya que a través de ello se detectan micro fugas y se retroalimenta al equipo de filtros, además de consolidar como fortaleza para controlar la concentración de CO₂ en la cerveza que se ha favorecido de manera significativa.

La propuesta para mantener el control en el proceso de servicio es el siguiente:

- ✓ Involucrar al jefe de turno para mantener el control de las mejoras.
- ✓ Entrenar a los operadores en el nuevo flujo de control de concentración de CO₂ para los sistemas de filtración.
- ✓ Con la propuesta de monitoreo de fugas de CO₂ se asegurará mantener equipos herméticos y que el flujo de atención a esos avisos que favorezca la agilidad de atender esto hallazgos.

6.4 CONTROL DE UTILIZACIÓN DE CO₂ PARA ENVASADO DE CERVEZA.

En conjunto con el equipo de envasado, se define la rutina de pruebas de estanqueidad en las llenadoras de las líneas de envasado:

RUTINA DE PRUEBA DE ESTANQUEIDAD SEM 40					
LÍNEA	LLENADORA	CERRAR VALVULA DE ALIMENTACIÓN DE CO2	ANOTAR LA PRESIÓN EN EL TAZÓN	ANOTAR LA PRESIÓN DEL TAZÓN DESPUES DE 1 MIN	CAIDA DE PRESIÓN EN TAZÓN
1	A				0.00
	B				0.00
2	A	SI	2.50	2.46	0.04
	B	SI	2.38	2.37	0.01
3	A	SI	2.10	2.06	0.04
	B				0.00
4	A				0.00
	B				0.00
5	A				0.00
	B				0.00
6	A	SI	2.40	2.30	0.10
	B				0.00
7	A				0.00

Figura 72. Seguimiento oportuno para controlar micro fugas de CO₂ en el área llenadora de cerveza.

La propuesta para mantener el control en el proceso de servicio es el siguiente:

- ✓ Involucrar al jefe de turno para mantener el control de las mejoras.
- ✓ Entrenar a los operadores en el nuevo flujo de trabajo en agua carbonatada y plantas de CO₂.
- ✓ Con la propuesta de monitoreo de fugas de CO₂ se asegurará mantener equipos herméticos y que el flujo que favorezca la agilidad de la aplicación de CO₂.

Tabla 20. Plan de acción para controlar las pruebas de estanqueidad en el envasado de cerveza.

No.	Fecha de reunión	Asunto	Acción	Comentario	Fecha límite	Quién	Pilar	Estado
1	12/06/23	Consumos de CO2	Retomar rutinas de fotografías y de vaciado de datos de consumos de CO2	Generar el fotografiado de los medidores de CO2, por medio del operador de cada llenadora para los gráficos de los consumos de CO2 de cada línea.	24/06/23	Supervisor de cada línea/Carolina Ancona	AMBIENTAL	Completa
2	12/06/23	Identificación de tubería de CO2 en el área de tuneles	Generar la identificación de la tubería de CO2 por medio de pintura naranja	Realizar la identificación y señalización de la tubería de CO2 omitiendo la tubería obsoleta que se tiene para evitar descompensaciones de presión.	24/06/23	Carolina Ancona/Guillermo Nova	AMBIENTAL	En Proceso
3	12/06/23	Limpieza de valvulas Juggomatic	Generar un mantenimiento a las valvulas Juggomatic y limpieza a los medidores de CO2	Se realiza limpieza de los medidores de CO2 para una asegurar una correcta lectura de los consumos del CO2	24/06/23	Carolina Ancona/Guillermo Nova	AMBIENTAL	No Iniciada
4	12/06/23	Realizar limpieza de los filtros de CO2	Realizar limpieza de los filtros de CO2, de pie de llenadora	Se observa que se carece de mantenimiento en los filtros de CO2 de pie de llenadora	24/06/23	Carolina Ancona	AMBIENTAL	No Iniciada
5	12/06/23	Realizar pruebas de estanqueidad	Generar las pruebas de estanqueidad para revisar caídas de presión en las llenadoras.	Se revisan las condiciones de las llenadoras para las caídas de presión en caso de no cumplir estanqueidad	24/06/23	Carolina Ancona/Guillermo Nova	AMBIENTAL	Completa
5	12/06/23	Realizar pruebas de estanqueidad	Generar las pruebas de estanqueidad para revisar caídas de presión en las llenadoras.	Prueba en L14 pendiente por paro.	24/06/23	Carolina Ancona/Guillermo Nova	AMBIENTAL	Retrasada

Nota: Adoptado de formato plan de acción, Fuente elaboración propia, 2023.

7. RESULTADOS SOBRE LA APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA SIX SIGMA.

El estudio de caso que se presenta se realiza en una planta cervecera fundada en los años 80's, la cual produce cerca de 10,000 hectolitros de cerveza al año en la Ciudad de México. Sus equipos de producción son mixtos combinando sistemas convencionales y de alta tecnología para la captura de CO₂. Los objetivos de la investigación que se definieron son:

Objetivo General

Mejora de la sustentabilidad del proceso de producción de cerveza con respecto al uso de CO₂ cumpliendo las características de calidad.

Bloque: aumento de recuperación de CO₂

Se logro un avance positivo de 12.20% anual en el volumen de captación de CO₂, realizando una comparativa del 2022 vs 2023, tomando como punto de partida la estandarización del proceso de recuperación de CO₂ que se logró estabilizar en el segundo trimestre del año 2023 teniendo un resultado favorable en el segundo semestre, esto ayuda a que la cervecería sea autosostenible logrando recuperar más CO₂ de lo provisto, tal como se observa en la tabla 21.

Bloque: reducción de uso de CO₂

Se logró una reducción de 6.01% anual en el consumo de CO₂ para el proceso de elaboración de cerveza respecto al uso de CO₂, se nota una depreciación sobre el resultado final esperado debido a que la estandarización de procesos para controlar el contenido de CO₂ en la cerveza fue escalonado, dando prioridad el área de carbonatación de agua, después el área de filtración de cerveza y por último el área de envasado ejecutado en el último semestre del 2023, por lo que no se puede apreciar muy bien el resultado esperado, sin embargo, el último trimestre del año muestra un mejor escenario de cierre de anual.

Realizando una comparativa sobre desempeño del segundo semestre del año 2022 vs 2023, notamos mejores resultados siendo más convincentes los resultados.

Tabla 22. Cantidad de CO₂ entre hectolitros de cerveza envasada. (kg/hl) anual .

DESEMPEÑO SOBRE LA REUTILIZACIÓN DE CO2			
KPI	2022	2023	Resultado
Factor de recuperación CO2	3.25	3.61	12.20%
Factor de consumo CO2	3.66	3.44	-6.01%

Nota: Fuente elaboración propia, 2023.

Tabla 21. comparación de cantidad de CO₂ entre hectolitros de cerveza envasada. (kg/hl).

DESEMPEÑO SOBRE LA REUTILIZACIÓN DE CO2			
KPI	2º Semestre 2022	2º Semestre 2023	Resultado
Factor de recuperación CO2	3.25	3.74	13.10%
Factor de consumo CO2	3.66	3.16	-13.66%

Nota: Fuente elaboración propia, 2023.

Con el objeto de diseñar e implementar los cambios se utilizó la metodología Lean Six Sigma, a continuación, se describen los principales avances que se tuvieron durante la implementación de dicha metodología.

Definir:

Mediante el Project Charter se definió el propósito, alcance y detalles del proyecto además de la evaluar las variables críticas del proyecto.

Medir:

Mediante el diagrama SIPOC se analizó el proceso de recuperación, así como el uso del CO₂ en las áreas productivas ya mencionadas, se elaboró el plan de recolección de datos para realizar las pruebas en cada etapa crítica que abarca el proceso cervecero y mejorar la reutilización de este insumo mediante el análisis de la varianza de ppm de O₂.

Analizar

En esta fase se identificó las causas que estaban relacionadas con el déficit por el cual no se llegaba a la recuperación ideal diaria y a su vez la estrategia ideal para reducir tiempos de conexión en tanques fermentadores (cierre de la válvula de venteo hacia la atmósfera y apertura de la válvula de recuperación)., así como el consumo de este insumo vital parale proceso cervecero.

Con el análisis de la varianza encontramos el modelo que logra mejorar el proceso de recuperación de CO₂ en la cervecería.

Mejorar

Con la fase de mejora se logró incrementar el aprovechamiento en la reutilización del CO₂ en ambos procesos mediante los siguientes análisis:

- ✓ Un nuevo esquema más rápido y preciso para determinar la pureza del CO₂, ya que el inicio de su recuperación depende de alcanzar una pureza de 99.90% con ello lograr una recuperación efectiva sobre los tanques fermentadores.
- ✓ Un nuevo esquema más rápido y preciso para evaluar y controlar el contenido de CO₂ en las áreas como filtración de cerveza y envasado.
- ✓ La integración del personal del departamento de Energías y Fluidos (E&F) en el proceso de fermentación fue clave para validar el procedimiento sobre el tiempo óptimo para la

conexión de los fermentadores a recuperación (cierre de la válvula de venteo hacia la atmósfera y apertura de la válvula de recuperación), con ello lograr ocupar el 100% de recuperación de CO₂ de acuerdo con la capacidad instalada, brindando al equipo de trabajo del área de fermentación soporte.

- ✓ Concientización con los operadores de las áreas carbonatación de agua, envasado y el área de filtración de cerveza con respecto a su salud mediante la validación de equipos para mantener cero fugas de CO₂.
- ✓ Eliminar malas prácticas de aplicación de CO₂ para bajar el nivel de parámetros como oxígeno y ph en diferentes puntos del proceso cervecero.
- ✓ Propuesta de mejora para estandarización y controles visuales del área a través de manómetros, cruciales para controlar el consumo.
- ✓ La implementación de un *poka yoke* para llevar a cabo pruebas sobre el nivel de hermeticidad de las llenadoras del envasado.

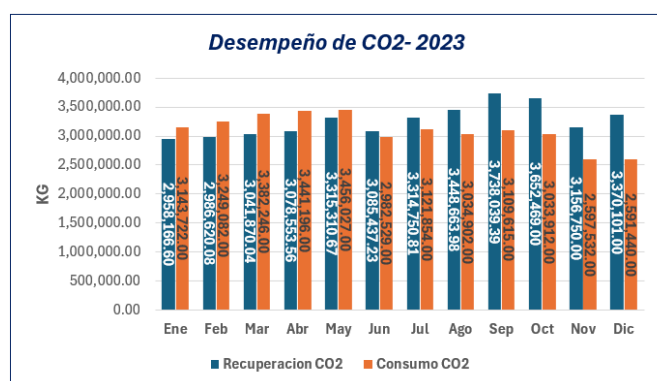


Figura 74. Tendencia positiva para reutilización de CO₂.

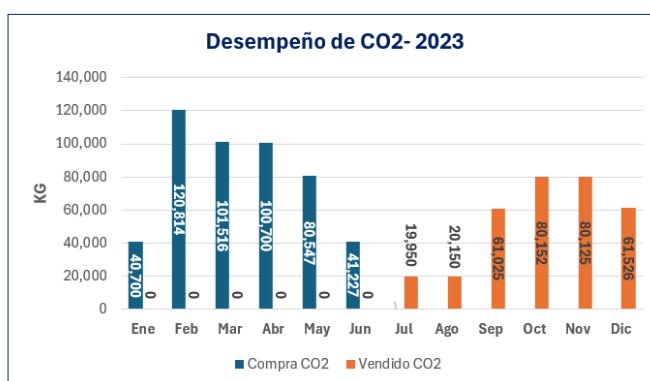


Figura 73. Venta de excedente de CO₂.

Control

Para lograr el control en la reducción de los tiempos de conexión de tanques fermentadores (cierre de la válvula de venteo hacia la atmósfera y apertura de la válvula de recuperación) y las mejoras encontradas para reducir el uso adecuado del CO₂, concluimos lo siguiente:

- ✓ Involucrar a los ingenieros, así como las jefaturas de producción para mantener el control de las mejoras.
- ✓ Mantener los flujos propuestos y la implementación de procedimientos para mejorar la tasa de recuperación y el uso de CO₂ en las áreas productivas ya mencionadas.

- ✓ Entrenamientos a los colaboradores de nuevo ingreso, así como al personal que rotan puestos de trabajo, muchos de los errores operacionales ocurren por este tema impactando a la calidad de producto.
- ✓ La implementación de indicadores de variables de proceso críticas cada vez más retadoras, no caer en la zona de confort (frecuencia de conexión óptima de los fermentadores para mandar el CO₂ a recuperación, así como KPIs de consumo de CO₂ de cada área).
- ✓ Establecer metas u objetivos ya sean individuales para fomentar la competitividad sana y ser una referencia en buenas prácticas de operación con el CO₂ en la región.
- ✓ Realizar evaluaciones por parte personal del departamento de Energías y Fluidos (E&F) para validar procesos de manera al azar.

Con la aplicación de la metodología Lean Six Sigma logramos determinar el tiempo óptimo de conexión de tanques fermentadores en un 30%(de 18 horas transcurrido la fermentación a 12 horas) teniendo como consecuencia el aumento de la satisfacción de la cervecera, así como la productividad de la cervecería al generar ventas de subproductos en el mercado interno con potencial al mercado externo.

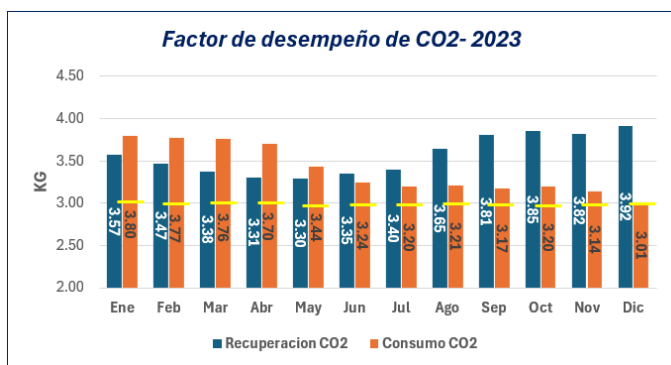


Figura 76. Tendencia de factor de desempeño de Recuperación y consumo de CO₂.

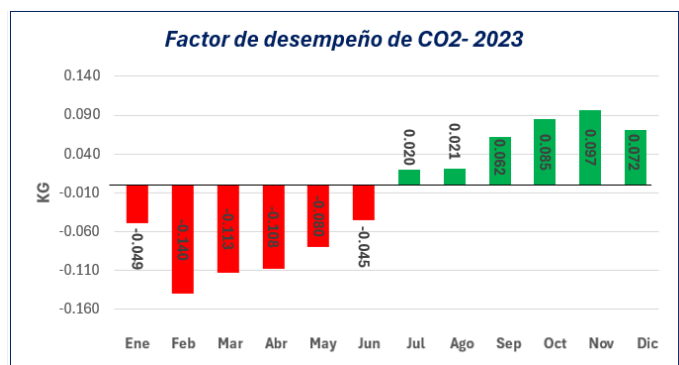


Figura 75. Factor de CO₂ (comprado-vendido/cerveza envasada).

8. CONCLUSIONES

El objetivo de este caso de estudio es la recuperación y la reutilización de CO₂ en una empresa cervecera. La metodología utilizada es Lean Six Sigma. Se inicia en el sistema de captura de CO₂ en la fermentación enfocándose en controlar la liberación de los venteos de CO₂ a la atmósfera, con el objeto de contribuir directamente a la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero, ayudar a mitigar el cambio climático y sus impactos asociados. También puede generar beneficios económicos significativos con la captura y reutilizando el CO₂, por reducción de comprar CO₂ adicional, además que los excedentes de CO₂ pueden ser vendidos como subproducto.

Al implementar tecnologías avanzadas y prácticas que aquí se recomiendan se logra aumentar la captura de CO₂ y reutilizarlo en forma eficiente. Con ello esta cervecería pueden reducir su huella de carbono cumpliendo con las regulaciones ambientales locales y globales, evitando posibles sanciones y multas. Esto no solo beneficia al medio ambiente, sino que también puede mejorar la reputación y la sostenibilidad a largo plazo de la empresa.

En el establecimiento de tiempos de liberación de emisiones e inicio de recuperación de CO₂ en los tanques fermentadores, se aplicó la metodología Lean Six Sigma y el análisis de la varianza de ppm de oxígeno disuelto para controlar la pureza de CO₂. Esta metodología es efectiva cuando se sigue la estructura DMAIC, ya que nos ayudó a reducir la variación del proceso de recuperación de CO₂ sin afectar la calidad del producto. También permitió identificar la causa raíz de los problemas del consumo no óptimo y el análisis de la varianza posibilitó reducir el tamaño de la muestra de los datos y las pruebas en la reutilización de CO₂.

En este estudio de caso, fue posible identificar la causa raíz en el proceso de fermentación al controlar la variabilidad de los tiempos de conexión oportuna de los tanques fermentadores para la recuperación de CO₂. Basados en el análisis anterior, se estableció una estrategia para hacerlo factible incorporando una alianza entre producción y el personal del departamento de Energías y Fluidos (E&F).

Por otro lado, en cuestión de uso de CO₂, notamos que no le daban la debida atención al consumo de CO₂ para la carbonatación de la cerveza, encontrando áreas de oportunidad en temas de hermeticidad de equipos, estandarización de proceso para la adición de CO₂, así como el control de volumen de este insumo en el agua carbonatada y la cerveza diluida, esto

fue clave para la mejora sustentable en el uso de CO₂ apropiadamente sin comprometer la calidad del producto.

Por ello concluimos que, con relación al planteamiento inicial del estudio de caso, la metodología Six Sigma sí es favorable para este modelo de negocio y permitió mejorar la tasa de captura, así como la reutilización de este insumo valioso para el proceso cervecero manteniendo los estándares de calidad a través de la reducción de malas prácticas operacionales y la gestión de indicadores se logra asegurar la calidad del CO₂ y su adecuada aplicación en la cervecería de la ciudad de México.

Finalmente, es necesario reforzar la importancia de los procesos con los colaboradores, transmitir el compromiso de la alta gerencia para tener éxito y enfocar el cambio en cuatro aspectos fundamentales: gente, organización, procesos y recursos técnicos para mantener la estandarización de la mejora.

9. RECOMENDACIONES

Con base al estudio realizado, considerando las tendencias de la importancia de la reducción de la emisión del CO₂ al ambiente y la utilización en el proceso cervecero se recomienda plantear a largo plazo lo siguiente:

- ✓ Implementar medidores de ppm de O₂ en los puntos de muestreos ya establecidos mejorando así tiempos de conexión basado a condición, se tendría una mejor visibilidad en tiempo real de la pureza de CO₂ y ser eficientes aún más la recuperación.
- ✓ Gestionar presupuesto para instalar un nuevo cabezal para recuperar CO₂ con pureza más baja, direccionarlas exclusivamente hacia las plantas con “stripper”.
- ✓ Gestionar presupuesto para la adquisición de una nueva planta de CO₂ con “stripper” con capacidad de 2000 kg/Hora.
- ✓ Implementar un plan de capacitación a colaboradores de nuevo ingreso, se detecta que hay rotaciones continuas.
- ✓ Desarrollar procedimientos e instrucciones de trabajo afines de garantizar el control de uso de CO₂.
- ✓ Establecer objetivos ya sea individuales para promover la competencia sana con el adueñamiento de equipos, buscando las buenas prácticas de operación y ser la referencia en la zona.
- ✓ Dar seguimiento a estos puntos mediante auditorías periódicas para mantener el sistema.

Dado que, la experiencia nos ha demostrado que ninguna metodología es eficaz si no existe compromiso de toda la organización por lo que recomendamos un compromiso total de todos los integrantes de la organización de la cervecería en el uso y aplicación de esta metodología Lean Six Sigma.

Finalmente, son necesarios cursos periódicos y comunicación de los indicadores claves al personal operativo, con la finalidad de que ellos tengan una visión de cómo se está comportando la productividad de la planta, así como la participación a la industria limpia promoviendo la venta de subproductos; De la misma forma el impacto que tiene la calidad con el producto final en relación con la satisfacción del cliente. Es necesario realizar evaluaciones cada trimestre de satisfacción del usuario para identificar nuevas áreas de oportunidad y darles solución.

BIBLIOGRAFÍA

Aguilar Peris, J. (2003). El Efecto Invernadero, el Cambio Climático, la Crisis Medioambiental y el Futuro de la Tierra. España: Real Academia Nacional de Medicina.

Cantú, E.(2021) Cerveceros de México, México: Revista agroindustria cervecera en México.

Eduardo Navarro, V. G. (2017). Metodología e implementación de Six Sigma. 3C: investigación pensamiento crítico, 73-80.

I.S. HORNSEY (2000). Elaboracion de cerveza. Microbiologia y tecnologia, España: Acribia

INEGYCEI (2018). Inventario Nacional de Emisiones de Gases y Compuestos de Efecto Invernadero 1990-2015, México

INEGI (2021). Conociendo la Industria de la cerveza, México.

Gallardo Ramírez, J. (2015). Implementación de la metodología Six Sigma en una empresa maquiladora. México D.F: Universidad Nacional Autónoma de México.

Guerra, J.J& Lacy, R. (2013), Estrategia Nacional de Cambio Climático. Visión 10-20-40, México: Semarnat.

Pries, K. H. (2009). Six Sigma for the New Millennium A CSSBB Guidebook (segunda edición ed.).Estados unidos: ASQ.

Vega, L. F. (2010). El CO2 como recurso de la captura a los usos industriales (primera edición ed.). Barcelona: Fundación gas natural.