

**MEJORAMIENTO DEL PROCESO DE GENERACIÓN DE CO₂, EN LOS
TANQUES FERMENTADORES DE LA CERVECERÍA DE BUCARAMANGA.**

CARLOS FERNANDO VARGAS GUTIÉRREZ.

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BUCARAMANGA**

2009.

**MEJORAMIENTO DEL PROCESO DE GENERACIÓN DE CO₂, EN LOS
TANQUES FERMENTADORES DE LA CERVECERÍA DE BUCARAMANGA.**

CARLOS FERNANDO VARGAS GUTIÉRREZ

**Trabajo de Grado presentando como requisito para optar el título de
Ingeniero Químico.**

Director

**Ingeniero Químico. Alexander Jiménez Rodríguez
Maestro Cervecerero Cervecería de Bucaramanga.**

Codirector

**M.Sc. CRISÓSTOMO BARAJAS FERREIRA.
Universidad Industrial de Santander.**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BUCARAMANGA
2009.**

DEDICATORIA.

Gratitud infinita a Dios por acompañarme y guiarme en cada uno de mis sueños. Por darle a mi vida la motivación más grande como regalo que un 9 Junio llegó a mí para llenar el resto de mis días de luz y fuerzas para batallar.

A mis padres y la fortuna de tenerlos como eje vital en todo los proyectos que quiero llevar a cabo. Su esfuerzo, su consejo y cada uno de los valores inculcados han hecho de mí una persona incansable en mejorar día a día.

A mis padres putativos Tía Mona y Jorge, gracias eternamente por acogerme en su hogar.

A mis Abuelitos y en especial a mi abuelo Jaime, este triunfo es de los dos.

A mi muñeca y mi beto mis hermanos del alma.

A cada uno de mis amigos, viví, Cesar, Sergio y pablo, están en lo más profundo de mi corazón, gracias por todos los momentos vividos.

NANO.

AGRADECIMIENTOS.

Quiero agradecer al Dr. Jaime Eugenio Gutiérrez Prieto, por haberme brindado la oportunidad para desarrollar mi práctica empresarial en la cervecería de Bucaramanga, y así adquirir conocimientos y experiencia para mi vida profesional. Al Ingeniero Cesar Augusto Gómez Plata y al Ingeniero Alexander Jiménez Rodríguez, su apoyo, guía y colaboración, fueron vitales para la culminación de este proyecto. Un agradecimiento especial a todos los operarios que de forma directa o indirecta me brindaron su ayuda.

Al profesor Crisóstomo Barajas mi codirector de práctica, mil gracias por su invaluable aporte y consejo para culminar exitosamente la práctica.

A mi gloriosa alma mater la Universidad Industrial de Santander y mi escuela de Ingeniería Química, que en mis 5 años de permanencia en ellas, sus espacios sirvieron como recinto para adquirir conocimiento y conocer el mundo de la academia.

A cada uno de mis profesores, cada palabra sirvió para mi formación profesional y humana.

Mis compañeros de y amigos, muchas gracias por brindarme su compañía y amistad.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	1
1 GENERALIDADES.	4
1.1.PROCESO CERVECERO I.	4
1.2.FERMENTACIÓN.	6
1.3.PROCESO CERVECERO II.	8
2 METODOLOGÍA.	9
2.1.SOBRELLENADO TANQUES FERMENTADORES.	9
2.2.GENERACIÓN DE CO ₂ .	10
2.3.REBOTES DE ESPUMA, CONTRAPRESIÓN DE TANQUES FERMENTADORES, CONTRAPRESIÓN DE LÍNEA DE RECOLECCIÓN Y CONEXIÓN DE LOS TANQUES FERMENTADORES.	11
3 RESULTADOS Y ANÁLISIS.	13
3.1. SOBRELLENADO TANQUES FERMENTADORES.	13
3.2. GENERACIÓN DE CO ₂ .	16
3.2.1. Curva de generación.	16
3.2.1.1. Ecuación de Balling.	17
3.2.1.2. Ahorro de gas, tiempo y pureza de conexión.	18
3.2.2. Curva de atenuación.	21
3.2.2.1. Estimativo de CO ₂ generado por los tanques fermentadores de la cervecería.	21
3.2.3. Existencia de CO ₂ .	23
3.3.REBOTES DE ESPUMA, CONTRAPRESIÓN DE TANQUES FERMENTADORES, CONTRAPRESIÓN DE LÍNEA DE RECOLECCIÓN Y CONEXIÓN DE LOS TANQUES FERMENTADORES.	24
3.3.1. Estándar de Recolección de CO ₂	26
4 CONCLUSIONES.	27
5 RECOMENDACIONES	28
6 BIBLIOGRAFÍA.	29

LISTA DE FIGURAS.

	Pág.
Figura 1. Diagrama de Flujo del Proceso Cervecerero.	4
Figura 2. Efecto de las variables en la fermentación.	7
Figura 3. Descripción metodológica de la realización del estándar.	9
Figura 4. Curvas de generación de CO ₂ y ecuación de pureza para los tanques de 2700hl: Tiempo vs pureza, tiempo vs extracto real.	20
Figura 5. Curvas de generación de CO ₂ y ecuación de pureza para los tanques de 1800hl: Tiempo vs pureza, tiempo vs extracto real.	20
Figura 6. Inventarios de CO ₂ desde el 3 de noviembre de 2008 hasta el 20 de abril de 2009.	23
Figura 7. Relación de la producción de CO ₂ mensual y tanques conectados mes a mes.	24
Figura 8. Tanques rebotados vs. tanques no rebotados.	25

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Condiciones establecidas para la realización de los cálculos.	13
Tabla 2. Valores de volumen (hl) de la línea de recibo de mosto.	14
Tabla 3. Valores establecidos en el programa de control.	15
Tabla 4. Kilogramos de CO ₂ recuperados conectando el tanque fermentador de 2700 a las 17 horas y el tanque fermentador de 1800hl a las 19 horas.	18
Tabla 5. Relación de la pureza de CO ₂ , extracto real, extracto aparente y tiempo después de llenado.	19
Tabla 6. Kilogramos de CO ₂ recuperados conectando los tanques de 2700hl y 1800hl a las 8 y 10 horas respectivamente.	20
Tabla 7. Valores de las pruebas realizadas para hallar la atenuación del extracto.	22
Tabla 8. Valor estimado de la cantidad de CO ₂ producido por los tanques fermentadores de la cervecería, según valores del estándar de generación.	22

ANEXOS.

	Pág.
Anexo 1. Proceso Cervecerero-Diagramas de Proceso.	31
Anexo 2. Generalidades de los resultados y análisis de datos.	35
Anexo 3. Ecuaciones para el desarrollo experimental.	41

GLOSARIO.

Espejo de tanque Fermentador: es el panel que sirve para realizar las conexiones manuales de la tubería para llenar, desocupar y realizar limpieza al tanque.

Extracto: Es la fracción de sustancias sólidas disueltas en el mosto (azúcares, proteínas, minerales etc.), la mayoría de estos componentes son azúcares.

Extracto Aparente: Es el extracto medido en la cerveza (considerando la influencia del alcohol).

Extracto Real: Es el extracto aparente con la corrección de la influencia del alcohol.

Grados Plato (°P): Es la unidad de medida de concentración en peso del extracto de un mosto. Se simboliza por °P. y se expresa de la siguiente forma:

$$^{\circ}P = \frac{\text{kg de extracto}}{100 \text{ kg de mosto o cerveza}}$$

Grado real de Fermentación: Porcentaje de extracto que puede ser fermentado.

Lager: Tipo de fermentación caracterizada por la sedimentación de la levadura cuando esta culmina.

Merma: Pérdida de materias primas, producto en proceso o terminado.

Mosto: Sustancia rica en azúcares que sirve como alimento a la levadura cervecera.

QC-Story: Método de resolución de problemas, basado en la consideración de hechos y datos, sin especulación, para un problema que está causado por numerosos elementos [1].

Uniproceso: Se refiere a la realización de la fermentación y la maduración en un mismo proceso. Los tanques en los que se lleva a cabo se denominan unitanques.

Rebote de Espuma: Es una cantidad considerable de espuma que se genera por fluctuaciones en el tanque fermentador y llega a sala de máquinas por la línea de recolección de CO₂.

RESUMEN

TITULO: MEJORAMIENTO DEL PROCESO DE GENERACIÓN DE CO₂ EN LOS TANQUES FERMENTADORES DE LA CERVECERÍA DE BUCARAMANGA.*

AUTOR: CARLOS FERNANDO VARGAS GUTIÉRREZ.**

PALABRAS CLAVE: Proceso de fermentación, generación de CO₂, elaboración de cerveza, producción de CO₂, almacenamiento y suministro de CO₂, tanques fermentadores, mosto, agua.

DESCRIPCIÓN.

El proceso de fermentación, es una operación básica en todas las compañías cerveceras. Este proceso se caracteriza por otorgar propiedades organolépticas al producto final. El mosto es procesado en una reacción metabólica exotérmica por las levaduras cerveceras. Esos azúcares fermentables son convertidos en etanol y dióxido de carbono con desprendimiento de calor.

El dióxido de carbono es un subproducto de esta reacción el cual es usado en diferentes partes del proceso cervecero. Este es recolectado, procesado y purificado en la planta de CO₂. Todas las condiciones de la fermentación juegan un papel importante en la generación de gas, de hecho este proceso tiene un gran valor en la elaboración de cerveza. El CO₂ es usado para: carbonatar cerveza, contrapresionar los tanques, para la filtración y manipulación de líneas, y para el envasado.

Por esta razón, la cervecería de Bucaramanga quiso mejorar la generación de CO₂, ya que el CO₂ es usado en gran número de procesos y representa un ahorro de dinero. Este proyecto se enfocó para mejorar la generación del gas por medio de planes de acción los cuales coadyuvaron a desarrollar un estándar donde estuvieran algunas actividades para mejorar este proceso.

*Práctica Empresarial.

**Escuela de Ingeniería Química. Director: Ing. Alexander Jiménez Rodríguez Cervecería de Bucaramanga, Co-Director: M.Sc Crisóstomo Barajas Ferreira.

ABSTRACT

TITLE: IMPROVING PROCESS OF GENERATION OF CO₂ IN FERMENTATION VESSEL AT BUCARAMANGA BREWER*

AUTHOR: CARLOS FERNANDO VARGAS GUTIÉRREZ**

KEYWORDS: Fermentation process, generation of CO₂, brewing, production of CO₂, Storage of CO₂, CO₂ supply, fermentation vessel, wort, water.

DESCRIPTION

The fermentation process is a basic operation at brewer companies. This process has been recognized as making an important contribution to the flavor of beer. The wort is processed in metabolic exothermic reaction by brewer yeast. These fermentable sugars are converted into ethanol and carbon dioxide, with the release of energy.

The carbon dioxide is a sub product of this reaction which is used in different parts of brewing process. It is collected, processed and purified at CO₂ plant. All fermentation vessels are connected by a collect's piping to purify plant. Every fermentation's conditions play an important role in generation of CO₂ actually this process has a big value to make beer. The uses for CO₂ are for: sparging beer, counterpressure beer storage tanks, purging filters and transfer lines and packing operations.

For that reason, the Bucaramanga brewer wanted to improve the generation of CO₂ since the CO₂ is used in large number of its process and it represents to save money. This project was focused to better the generation of CO₂ by the actions plans which helped to make a standard where there were some activities to meliorate the generation of gas.

*Internship, Bucaramanga Brewer.

** Chemical Engineering Department, Director: Ing. Alexander Jiménez Rodríguez Bucaramanga Brewer.. Co-director: M.Sc. Crisóstomo Barajas Ferreira

INTRODUCCIÓN

La cerveza es el producto que se obtiene a partir de la fermentación ocasionada por la levadura en los azúcares provenientes de los almidones de diferentes materias primas, en particular de la malta.

El proceso de fermentación, es influenciado por gran cantidad de variables que podrían afectar de manera directa o indirecta el desarrollo del producto final. Al ser este el que produce la cerveza, entre los objetivos trazados por una cervecería se encuentra lograr un proceso estándar, donde cada variable esté claramente identificada.

La cervecería de Bucaramanga¹ en la actualidad trabaja bajo los estándares de SAB-Miller los cuales están enfocados al desarrollo de un proceso de la más alta calidad, siempre con miras a entregar al consumidor productos excelentes.

Hoy por hoy se buscan mejores prácticas reduciendo desperdicios y alcanzando mayores rendimientos en todas las operaciones. Por esto los instructivos que proporcionan los estándares, se han estado actualizando proporcionando al trabajador bases universales para desempeñar adecuadamente sus actividades y con esto a su vez, darle un mayor control a las variables proceso.

Siguiendo estos criterios, se encontró que en los estándares que se tenían en el departamento de elaboración más precisamente en el área fermentación, existían algunas oportunidades de mejora para el proceso de fermentación más exactamente en la formulación de un estándar concerniente a la generación de CO₂.

¹ En la actualidad BAVARIA cuenta con 7 cervecerías en territorio nacional, todas adscritas desde el 2005 a la multinacional cervecera SAB-Miller.

A partir de lo anterior, el desarrollo de esta práctica empresarial se enfocó en identificar dichas oportunidades. Mediante un análisis causa y efecto, se evaluó la situación actual, logrando la implementación de planes de acción direccionados primordialmente al proceso de generación de CO₂ con miras a que las condiciones de este se mantengan dentro de los parámetros establecidos y disminuir los efectos que ocasiona al proceso de fermentación.

La importancia de llevar a cabo los planes de acción propuestos para mejorar la generación de CO₂, se encamina a incrementar la cantidad del gas recolectado, garantizando su existencia y reduciendo la inclusión ocasional en gastos unitarios. Anteriormente el promedio de existencia de CO₂ se mantenía en 50 toneladas, hoy en día ese valor pasó a 60 toneladas.

Al realizar los estudios, las pruebas y posterior análisis de las variables que intervienen en este proceso de generación, se buscó determinar el mejor comportamiento y las mejores prácticas en esta parte del proceso cervecero.

Las variables que se tuvieron en cuenta para la realización de pruebas y análisis son las siguientes: Extracto aparente y real, densidad, velocidad de flujo, presión interna de los tanques fermentadores y línea de recolección, tiempo de conexión y de recolección, pureza de CO₂.

Las variables: estudiadas, del proceso y las condiciones de este, generan una serie de salidas que mediante la implementación de esta práctica, se propone mejorarlas. Con la correlación de lo anterior y el análisis de resultados se buscó cuantificar en el proceso de generación de CO₂: la producción, suministro y existencia de CO₂ atando también a este, temas como el sobrellenado de los tanques fermentadores, los rebotes de espuma (en argot cotidiano rebose), presiones en los tanques fermentadores por encima de la especificación cuando la

línea de recolección se encuentra contra-presionada y los tiempos y pureza de CO₂ para la conexión del tanque a la plata purificadora.

Con el trabajo desarrollado conjuntamente entre el personal operativo, los ingenieros de mantenimiento y la supervisión de los Maestros Cerveceros, se observaron mejoras en el proceso, las cuales estaban sujetas a los objetivos que anteceden a este trabajo de grado.

Una vez efectuadas las tareas programadas en el plan de acción, gratamente se observa que las pérdidas de CO₂ son menores, la existencia del mismo se ha incrementado y el tiempo de recolección ha aumentado, al igual que la metodología propuesta se ha difundido mediante capacitaciones a los operarios del área; logrando que cada uno de estas mejoras hagan parte del proceso de estandarización de la fermentación que busca la cervecería.

1. GENERALIDADES

La industria cervecera dejó de ser un arte como se venía manejando hace cientos de años, para convertirse hoy en día en una ciencia que abarca un conjunto de conceptos multidisciplinarios que permiten constantemente el avance del proceso cervecero.

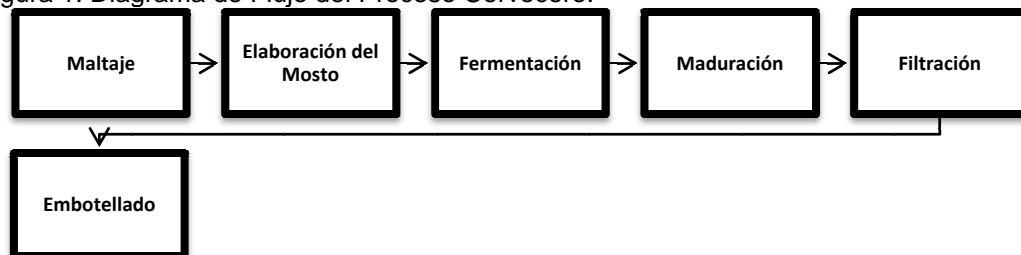
A continuación se relacionan una serie de conceptos teóricos que permiten describir el proceso mediante el cual se obtiene la cerveza, realizando una descripción de la etapa fermentativa.

1.1. PROCESO CERVECERO I

El proceso cervecero y la industria cervecera como tal, consta con 6 procesos principales que dan como resultado la cerveza para el consumo humano. El diagrama general del proceso cervecero se muestra en la figura 1 y en el anexo 1.

Comienza con una etapa en la cual el grano de cebada es sometido a una transformación por medio de cambios de temperatura en la que el producto final es la malta. Los cambios de temperatura otorgan la clase de malta. En el maltaje, las enzimas que se utilizarán en la elaboración del mosto se forman y los almidones del grano se hacen solubles [3][4][5].

Figura 1. Diagrama de Flujo del Proceso Cervecero.



Fuente: Autor

La malta se almacena durante 4 semanas para homogenizar sus propiedades y es transportada a la cervecería, donde es acopiada en silos. De los silos es transportada a los molinos, donde mediante una molienda húmeda, rompe la cáscara del grano dejando el endospermo al descubierto para que se lleve a cabo la liberación de almidones haciendo más efectiva la acción de las enzimas. Los adjuntos, también se muelen para disminuir el tamaño de partícula.

Realizado los pesajes de las materias primas, malta y los adjuntos pasan a un proceso de mezclado, donde por medio de rampas de temperaturas se crean los ambientes para que las enzimas comiencen a degradar las cadenas lineales y ramificadas del almidón; produciendo un líquido rico en azúcares. A este proceso se le llama maceración y es en este donde se le imprime la marca a la cerveza, al igual que se le confieren sus propiedades organolépticas.

Terminada la etapa de mezcla, el líquido es bombeado a la “olla de Filtración”, la cual separa lo soluble (el mosto) del material insoluble (afrecho), siendo este último utilizado como lecho filtrante en el falso fondo que posee la olla.

Finalizada la etapa anterior, el líquido rico en azúcares es denominado mosto. El mosto después de su filtración pasa por una etapa de cocción, que consiste en calentar la masa durante 60 minutos a altas temperaturas a fin de inactivar las enzimas, darle color al mosto, proporcionar estabilidad microbiológica, precipitar proteínas y adecuar extracto (concentrar el mosto) y pH. En esta olla se adiciona el lúpulo para que sea solubilizado.

El mosto después se sedimenta y se enfría. Lo primero se realiza con el fin de retirar el *trub* (masa de proteínas, cascarillas, y sedimento que aún le quede al mosto), por medio de fuerzas centrifugas. El enfriamiento se realiza por intercambiadores de placas que le reducen la temperatura entre 7-11°C. Al enfriarlo se le inyecta aire estéril, para crear las condiciones adecuadas para que

la levadura que se adiciona después de la aireación tenga el medio para la transformación del mosto en cerveza y la reproducción de ellas mismas [5][6][7][8][1].

1.2.FERMENTACIÓN

Tradicionalmente la fermentación cervecera es adscrita como el proceso en donde los carbohidratos fermentables son transformados en etanol y otros subproductos y por medio de la interacción con otros constituyentes del mosto, muchos de los compuestos de sabor en la cerveza se desarrollan. Por lo anterior, la fermentación está sometida a estudios permanentes para lograr un mayor entendimiento de las reacciones que en esta ocurren y ayudar a controlar esta etapa del proceso cervecero. Aún cuando la operación de una cervecería moderna controla sus fermentaciones, ocasionalmente ocurren cambios repetibles e inexplicables en las características del proceso. Estos incluyen entre otros: el tiempo de fermentación, la atenuación, perfiles de pH con el tiempo, perfiles de sabor, cosecha de levadura (cantidad), levadura en suspensión y formación de espuma. Estas características son afectadas por tres grandes factores: 1. Factores químicos y bioquímicos, 2. Factores microbiológicos, y 3. Factores físicos (Ambiente donde se desarrolla la fermentación) [9].

La cervecería BAVARIA Bucaramanga emplea para su fermentación 21 tanques cilíndrico-cónicos, de los cuales 12 son de 1800hl (4 cocimientos) y los restantes son de 2700hl (6 cocimientos) (Ver distribución de tanques en anexo 1). Todos los productos elaborados por BAVARIA, tienen fermentaciones tipo *lager* que dura alrededor de 9 días, después de los cuales la cerveza es trasegada a tanques maduradores donde se enfría hasta -1.5°C para ser filtrada. La levadura que se utiliza es de la sepa *Saccharomyces Uvaru*[11] que al cumplir la etapa fermentativa se sedimenta y es recolectada para ser nuevamente utilizada o descartada cuando su viabilidad es baja.

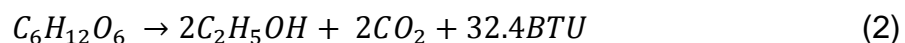
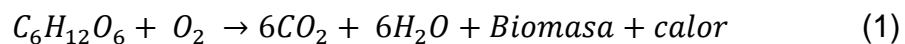
Los tanques poseen sistemas de control automatizados que permiten monitorizar y controlar las variables más importantes en esta parte del proceso (Ver anexo 1 diagrama P&ID) con el fin de asegurar una fermentación normal. El oxígeno, la temperatura, la presión, naturaleza del mosto, cantidad de levadura y agitación, son las variables claves. La figura 2 muestra cuál es el efecto de cada variable en el proceso [10][12][13].

Figura 2. Efecto de las variables en la fermentación.

	TEMPERATURA	PRESIÓN	AIREACIÓN	CANTIDAD DE LEVADURA	CONCENTRACIÓN DEL MOSTO	AGITACIÓN
	MULTIPLICACIÓN DE LA LEVADURA	+	-	+	-	-
INTENSIDAD DE LA FERMENTACIÓN	+	-	+	+	-	+
PÉRDIDA DE SUSTANCIAS AMARGAS	+	-	+	+	-	+
RETENCIÓN DE ESPUMA	-	+	-	-	-	-
CAIDA DEL pH	+	-	-	-	-	+
PRECIPITACIÓN DE PROTEÍNAS	+	-	-	-	-	+

Fuente: Departamento de Producción Cervecería de Bucaramanga.

Una fermentación controlada es sinónimo de buena calidad de cerveza (Entiéndase como buenas características microbiológicas y sensoriales del producto final), además de una generación de CO₂ constante. Este gas se genera durante las dos etapas de la fermentación, la aeróbica (Ec.1) y la anaeróbica (Ec.2), y es enviado a una planta de procesamiento de gas carbónico (ver anexo 1), donde es purificado y almacenado para una posterior utilización.



El CO₂ es utilizado en la industria cervecera principalmente en la carbonatación de la cerveza, en el envasado del líquido, en la contrapresión de tanques y en la carbonatación de agua des-aireada.

1.3. PROCESO CERVECERO II.

Luego de la etapa de fermentación, la cerveza entra a maduración, donde por acción del frío las partículas contenidas en la cerveza se sedimenta para facilitar la filtración y logra una cerveza sensorialmente más limpia [14].

El conjunto de procesos antes del embotellado se llama filtración. La cerveza madura se hace pasar por un filtro (generalmente de velas) al cual se le adiciona tierra diatomácea que permite remover sólidos suspendidos, dándole brillo a la cerveza. El producto filtrado se diluye con agua desaireada y carbonatada (previamente tratada), se acondiciona fisicoquímicamente y se carbonata. Seguidamente es almacenada en tanques a contrapresión o BBT.

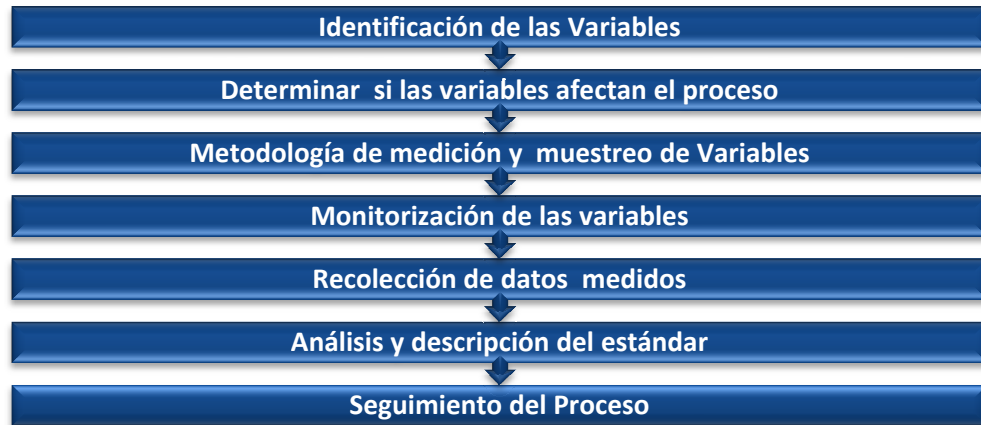
De los tanques a contrapresión la cerveza es enviada al salón de envase, donde se llenan los diferentes tipos de envases: botellas, latas o barriles según el formato que se requiera. Se tapa y pasteriza dándole estabilidad microbiológica para el consumo humano. La cerveza envasada se somete a controles de llenado y de calidad finalmente se encanastada para su posterior distribución y consumo [16].

2. METODOLOGÍA.

El desarrollo de la práctica empresarial, fue orientado en primera instancia a identificar si las oportunidades de mejora de generación de CO₂ repercutían de manera directa en el proceso, teniendo en cuenta las variables que no se encontraban en la documentación referente a fermentación [24] con que cuenta la cervecería.

Logrado lo anterior, se comenzó a realizar un seguimiento al: sobrellenado de tanques, procedimiento de recibo de cocimientos, conexión de tanques fermentadores a la línea de recolección, contrapresiones de los tanques y de la línea de recolección, rebotes por espuma y existencia de CO₂; con el fin de encontrar mejoras a estas prácticas y así realizar su inclusión al estándar de generación de CO₂.

Figura 3. Descripción metodológica de la realización del estándar.



Fuente: Autor.

2.1. SOBRELLENADO DE TANQUES FERMENTADORES.

Cada cocimiento se ve antecedido y precedido por un empuje con agua desaireada a fin de evitar mermas en el mosto. El cervero de turno, programa el

tanque de recibo en el supervisorio y el sistema de control inicia la secuencia de recibo de mosto o finalización del envío de este según sea el caso. Se observó que la señal enviada al actuador para abrir o cerrar el elemento final de control, no coincidía en ocasiones con el desarrollo del proceso, originando un sobrellenado por el ingreso de agua al tanque fermentador o una pérdida de mosto. Se identificó que los valores de hectolitros ingresados al sistema para controlar la apertura o cierre de válvulas en la línea de mosto, no concordaban con la cantidad de mosto bombeado al tanque al inicio o al final del cocimiento, por lo que fue necesario implementar un método que pudiera lograr una aproximación más fina de los datos que el proceso requería. Para lo anterior se realizaron mediciones de tuberías identificando sus longitudes, diámetros y determinar posteriormente volúmenes de los tramos involucrados. Se utilizaron las ecuaciones 3, 4, 5, y 6 (anexo 3) para hallar: área de sección transversal, volumen, velocidad y tiempo, respectivamente. Esto se realizó con el objetivo de modificar los valores antiguos que tenía el programa de control [17][18] con el que cuenta el área de fermentación, y corregir la dilución en los tanques y la merma de mosto. La dilución se determinó con un DMA 35n portátil [19] el cual marca los °P. Las muestras se realizaron con la ayuda del cocinero de turno y el caverero en la tubería de desagüe de cada tanque.

2.2. GENERACIÓN DE CO₂:

Durante el periodo comprendido de enero de 2008 a febrero de 2009 se realizaron 4 compras (86 toneladas en total) de CO₂ ocasionadas por baja existencia, que representaron un gasto de 68 millones de pesos. El inventario promedio que se manejaba del gas era de 50 toneladas por mes siendo 35 toneladas el valor de alarma para la cervecería. Este valor de alarma se presentó en 30 ocasiones durante el año, siendo 15t el valor más crítico y 66t el máximo. Con base en lo anterior, se creó la necesidad de evaluar la situación actual de generación de CO₂ con el fin de garantizar su disponibilidad por medio de mejores prácticas: la hora a la que deben ser conectados los tanques cuando se alcanza la

pureza mínima propuesta, la cantidad generada del gas por tanque, un procedimiento de conexión y métodos en caso de rebotes de espuma o contrapresiones.

Partiendo de esto, se comenzó a realizar pruebas para determinar el tiempo en que se alcanzaba la pureza mínima de gas y así hallar una ecuación que describiera el comportamiento del extracto real, extracto aparente, densidad y pureza CO₂, en función de la variable tiempo; hallando el tiempo mínimo requerido para alcanzar la pureza y la cantidad de CO₂ generado.

Para realizar los análisis, se tuvo en cuenta los pasos del instructivo 05-001999[20] para medición de extractos y alcohol con que cuenta la cervecería. Por medio de los medidores Anton Paar DMA 4500[21] y Anton Paar AlcoLyzer Plus[22], se obtuvieron los valores de extractos y densidad. Para las mediciones de pureza de CO₂ se utilizó el medidor Zahm y se siguió el procedimiento propuesto en el instructivo 05-000107[23]. Las muestras fueron tomadas en el grifo de cada tanque fermentador y en la salida de CO₂ que tienen en sus espejos.

2.3.REBOTES DE ESPUMA, CONTRAPRESIÓN DE TANQUES FERMENTADORES, CONTRAPRESIÓN DE LÍNEA DE RECOLECCIÓN Y CONEXIÓN DE LOS TANQUES FERMENTADORES.

El sistema de recolección de CO₂ involucra los tanques que estén conectados a la planta de recolección, las trampas de espuma que se encuentren en la línea y los boosters (compresores a la entrada de la planta de CO₂) que realizan la succión del gas generado. Las cuatro variables que se estudiaron tienen una correlación directa.

Las variaciones de presión que en ocasiones presenta la línea de recolección, se ven reflejadas en un aumento considerable de la presión superior de los tanques (que eventualmente alcanzan entre 10 a 12psi), y según estándares de SAB-Miller esta debe ser inferior a 4,35 psi. La acción de someter el tanque a una presión alta y luego disminuirla súbitamente, conlleva a rebotes de espuma. Las contrapresiones de la línea se originan bajo circunstancias específicas como: cambio de permanganato en la planta de CO₂, paradas por mantenimiento de equipos, fallas en algunos de los compresores y encendido y apagado de los compresores booster cuando la presión de la línea es inferior a 1psi.

Los rebotes de espuma repercuten en: eventuales paradas de la planta de recolección y purificación de CO₂, disminución de espuma del producto final, mermas en el área de fermentación, pérdidas de CO₂ y fluctuaciones en el grado real de fermentación.

La línea de recolección de CO₂ cuenta con un sensor de presión que envía una señal al sistema supervisorio, en el que se realiza seguimiento por medio de un gráfico de tendencia (ver anexo 2). Al someter la línea a las variaciones de presión mencionadas, se identificó que no se contaba con una válvula reguladora (independiente a la que se tiene en sala de máquinas), que aliviara la presión cuando la planta de purificación presente alguna anomalía.

Una vez identificadas las opciones de mejora mencionadas, se realizó un QC-Story con una serie de tareas programadas (planes de acción) a fin de disminuir las fluctuaciones a las que era sometida la línea.

Por otra parte, la conexión de los tanques realizada por los caveros, se debe desarrollar con el mismo método. En ese orden de ideas se recopiló la información de los operarios para desarrollar el instructivo de conexión de tanques fermentadores a la línea de CO₂.

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS.

Se logró con el presente trabajo determinar: los tiempos de empujes para evitar el sobrellenado de los tanques, el comportamiento del inicio de la fermentación al igual que la curva de atenuación del extracto, encontrando el tiempo mínimo y la pureza requerida para conectar el tanque fermentador, así como la cantidad de CO₂ generado. A partir de un enfoque económico se mostró la importancia de la realización el estudio, que quedó consignado en un estándar de generación de CO₂. Los rebotes, contrapresiones y mejores prácticas de conexión se recopilaron en el QC-Story (que se encuentra en etapa de aprobación), en el que se resaltan factores que coadyuvaron al mejoramiento de esas variables.

3.1. SOBRELLENADO DE TANQUES.

Tabla 1. Condiciones establecidas para la realización de los cálculos.

Flujo Volumétrico, (hl/h)	Flujo Volumétrico, (hl/s)	Velocidad de flujo, m/s	tiempo de un hl en fluir, (s)	Temperatura, °C
400	0,111	0,905	9,000	10

FUENTE: Autor

Los valores hallados teóricamente fueron ingresados al programa que controla el recibo de mosto. Considerando que las mediciones realizadas fueron de manera manual y para efectos de hallar el tiempo, se manejó un caudal promedio (ver tabla 1), se otorgó un margen de error de ± 2 hl. Para evitar la pérdida de mosto al inicio del recibo y al final, se modificaron los datos que se muestra en la tabla 2. El sistema de tuberías con diámetros, velocidades, áreas y cambios de áreas se muestra detalladamente en el anexo 2.

Tabla 2. Valores de volumen (hl) de la línea de recibo de mosto. Los valores corresponden a la tubería comprendida del enfriador de mosto al cono del tanque fermentador.

Punto de Referencia	Longitud *(m)	Diámetro (m)	Volumen (m3)	Volumen Total (hl)	Punto de Referencia	Longitud *(m)	Longitud Total, (m)	Diámetro (m)	Volumen (m3)	Volumen Total (hl)
Cono del TF 13	35,3	0,125	0,433	7,4	Cono del TF 24	55,5	94,3	0,125	0,681	9,9
Cono del TF 14	41,45	0,125	0,509	8,14	Cono del TF 26	73,8	112,6	0,125	0,906	12,1
Cono del TF 15	49,2	0,125	0,604	9,1	Cono del TF 27	65,75	104,55	0,125	0,807	11,1
Cono del TF 16	49,95	0,125	0,613	9,2	Cono del TF 28	79,5	118,3	0,125	0,976	12,8
Cono del TF 17	47,5	0,125	0,583	8,9	Cono del TF 29	72,15	110,95	0,125	0,885	11,9
Cono del TF 18	42,85	0,125	0,526	8,3	Cono del TF 30	88,75	127,55	0,125	1,089	13,9
Cono del TF 19	47,95	0,125	0,588	8,9	Cono del TF 31	80,7	119,5	0,125	0,99	12,9
Cono del TF 20	54,1	0,125	0,664	9,7	Cono del TF 32	96,85	135,65	0,125	1,189	14,9
Cono del TF 21	61,85	0,125	0,759	10,6	Cono del TF 33	88,8	127,6	0,125	1,09	13,9
Cono del TF 22	62,6	0,125	0,768	10,7	Cono del TF 34	94,8	133,6	0,125	1,163	14,7
Cono del TF 23	60,15	0,125	0,738	10,4	-	-	-	-	-	-

FUENTE: Autor

Con la colaboración del caveró, se observó que la cantidad de agua de ingreso a los tanques era apreciable (alrededor de 4 hectolitros), por lo que fue necesario disminuir los hectolitros que se ingresaban al sistema. En algunos casos se identificó pérdida de mosto-agua (valor de extracto mayor a 2 Φ) aumentando el valor de los hectolitros de empuje.

El propósito era alcanzar una concentración en el líquido de drenaje inferior a 1 Φ , para lograr esto, fue necesaria la comunicación con el cocinero, quien suministraba el valor bombeado de mosto. Este valor fue correlacionado con los hectolitros de la tabla y a partir de esto, se medía el tiempo de ingreso de líquido para luego hallar el valor real del volumen de agua que debería entrar al tanque. Cabe resaltar entre las perturbaciones más representativas las variaciones de flujo de la bomba de mosto y la confirmación de sensores o de actuadores por el sistema, a lo largo de la línea de mosto mientras se realizaba el acompañamiento.

Tabla 3. Valores establecidos en el programa de control del área de uniproceso.

Punto de Referencia	Tiempo*, (s)	Tiempo*, (s) + 1 hl	Valor empuje inicial, hl**	Valor empuje final, hl***	Punto de Referencia	Tiempo*, (s)	Tiempo*, (s) + 1 hl	Valor empuje inicial, hl**	Valor empuje final, hl***
Cono del TF 13	6	15	12	22	Cono del TF 24	6	15	12	27,2
Cono del TF 14	12	21	12	22	Cono del TF 26	17	26	11	27,6
Cono del TF 15	17	26	12	22	Cono del TF 27	8	17	12	27,6
Cono del TF 16	17	26	12	22	Cono del TF 28	20	29	13	29,4
Cono del TF 17	12	21	9	25	Cono del TF 29	11	20	13	29
Cono del TF 18	6	15	10	23	Cono del TF 30	24	33	13	33
Cono del TF 19	6	15	13	21,2	Cono del TF 31	14	23	13	28
Cono del TF 20	12	21	13	22,6	Cono del TF 32	17	26	15	35,2
Cono del TF 21	17	26	14	29,8	Cono del TF 33	8	17	15	32,2
Cono del TF 22	17	26	13	29	Cono del TF 34	8	17	15	33,5
Cono del TF 23	12	21	9	27,2	-	-	-	-	-

* Tiempo de ingreso de agua desde el espejo del TF a este. **hl que demora el mosto en llegar al tanque fermentador. ***hl de agua necesarios para empujar el mosto de la línea

Fuente: Autor

Con la premisa de garantizar el ingreso de únicamente un hectolitro de agua al tanque fermentador, se realizó un ajuste fino a las mediciones, obteniendo: el tiempo necesario para que el mosto llegue al cono del tanque, el tiempo que gasta un hectolitro adicional de agua para empujar el producto que queda en la línea y los valores del empuje inicial y final realizado por la línea de recibo de mosto. Los datos que se registraron finalmente en el sistema (consignados en la tabla 3) no difieren a los obtenidos inicialmente, indicando que las mediciones no se desviaron a las reales. Los valores consignados en la última columna de la tabla 3, tienen un tiempo adicional debido a un empuje manual de mosto realizado por el cocinero que el programa no registra.

Con los valores finales, se observó el ingreso de todo el mosto bombeado por cocinas a los tanques fermentadores y la disminución de entrada de agua a estos, lo que garantizó una concentración adecuada de sustratos para la elaboración de la cerveza y una reducción de la merma en fermentación.

El sobrellenado de tanques se controló significativamente, logrando disminuir en 10hl (como mínimo) el nivel habitual que se venía manejando, esto permitió ampliar la cámara libre que tiene el tanque en la parte superior para el recibo de gases y generación de espuma, contribuyendo a disminuir los eventos de rebotes ocasionados por sobrellenado.

3.2. GENERACIÓN DE CO₂.

La generación de CO₂ se enfocó en abarcar tres condiciones: desarrollar una curva de generación, una curva de atenuación y cuantificar la cantidad de CO₂ generado por los tanques fermentadores.

3.2.1. CURVA DE GENERACIÓN DE CO₂.

Una vez realizado el acondicionamiento del nivel de los tanques (condición importante para una fermentación adecuada), se comenzó la medición del extracto aparente y real entre las 12 y 24 horas después de dar inicio de fermentación. Conjuntamente se reportó el dato de pureza de CO₂ con el que se construyeron las gráficas de generación.

La realización de las pruebas en los tanques fermentadores fue aleatoria, metodología que se justifica por el proceso batch que tiene la cervecería. Antes de realizar la muestra, con la ayuda del caverero primero, se identificaba si se cumplían las condiciones de proceso del tanque (presión superior interna inferior a 1psi, regímenes de temperatura normales, adecuada inyección de levadura, aireación y temperatura de envío de mosto dentro de especificaciones técnicas). Confirmado lo anterior, se esperó que el tanque cumpliera como mínimo 12 horas para realizar la primera muestra. El muestreo se realizó cada 2 horas durante periodos de 8 horas. Los datos, al igual que el número de pruebas realizadas se muestran en el anexo 2.

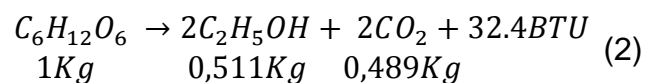
Con los resultados obtenidos se logró observar que la capacidad de los tanques fermentadores es proporcional a la rata de fermentación.

Con base en el instructivo 05-001407^[24] de uniproceso, se conocía que la pureza mínima de CO₂ para conectar un tanque a la planta de recolección es de 99,99% en un tiempo promedio de 24 horas. En la cervecería, el valor de pureza se había logrado disminuir a 99,90%, conectando los tanques fermentadores entre las 20 y 22 horas después de llenados.

La realización del estudio surgió del concepto que tenían los operarios del área, ya que en ocasiones los tanques alcanzaban la pureza en menor tiempo. Se encontró que los tanques grandes alcanzan las condiciones para ser conectados 17 horas después de ser llenado, mientras los pequeños lo hacen a las 19; reduciendo el tiempo de espera para la conexión de 3 a 5 horas para tanques de 2700hl y de 1 a 3 horas para tanques de 1800hl. Los valores de tiempo obtenidos son promedio, considerando las diferencias de fermentación y condiciones de operación.

Para determinar el ahorro de CO₂ se aplicó el desarrollo matemático de la ecuación de Balling.

3.2.1.1. ECUACIÓN DE BALLING.



El método es desarrollado mediante la solución de la ecuación 7 (anexo 3), que fue suministrada por la cervecería. Los datos obtenidos se recopilan en la tabla 4.

Tabla 4. Kilogramos de CO₂ recuperados conectando los tanques fermentadores de 2700 y 1800hl a las 17 y 19 horas respectivamente.

GANANCIA DE CO2 EN TANQUES DE 1800hl									
Tiempo despues de llenado	Extracto R, °P (%w/w)	Delta	kg CO2*hl/kg mosto	Extracto R, kg extrc/kg Mosto	Densidad, g/cm3	Densidad, kg/Hl	Extracto R, kg extrac/hl mosto	kg CO2	Diferencia de kg CO2 entre 19 horas y 22 horas
0	16	0,00	0,00	0,16	1,064	106,36	17,02	0,00	
19	13,79	2,21	1591,20	0,14	1,056	105,60	14,56	1790,51	
22	13,47	0,32	230,40	0,13	1,051	105,10	14,16	2047,10	257
GANANCIA DE CO2 EN TANQUES DE 2700hl									
Tiempo despues de llenado	Extracto R, °P (%w/w)	Delta	kg CO2*hl/kg mosto	Extracto R, kg extrc/kg Mosto	Densidad, g/cm3	Densidad, kg/Hl	Extracto R, kg extrac/hl mosto	kg CO2	Diferencia de kg CO2 entre 19 horas y 22 horas
0	16	0,00	0,00	0,16	1,064	106,36	17,02	0,00	
17	13,51	2,49	2689,20	0,14	1,055	105,50	14,25	3022,60	
22	13,01	0,50	540,00	0,13	1,050	105,00	13,66	3622,20	600

Fuente: Autor

Se observa la notable recuperación de gas que se acentúa en los tanques de 2700hl. Mensualmente en promedio se llenan 20 tanques de 2700hl y 24 tanques de 1800hl, representando al menos 7 toneladas en tanques grandes y 4 toneladas en tanques pequeños.

3.2.1.2. AHORRO DE GAS, TIEMPO Y PUREZA DE CONEXIÓN.

Aunque la cantidad de gas procesado era significativa, las existencias de los primeros días de la semana caían entre 30 y 35t, debido a que: se hacían los aseos en filtración, se contrapresionaban los BBT, se daba inicio a la filtración, se embotellaba producto y el gas generado decaía debido a la ausencia de conexión de nuevos tanques. Esta existencia irregular, hacía que el proceso en general no tuviera un rango de maniobrabilidad para enfrentar cualquier eventualidad que requiriera el gasto de CO₂

Fue así que a partir de febrero del presente año, se inició la modificación de los datos hallados, con el fin de establecer la mínima pureza de CO₂ que podía procesar la planta de CO₂ sin alterar la pureza del gas tratado (mayor a 99,998%).

Con la coordinación entre el personal del departamento de producción y el de servicios industriales, se iniciaron pruebas para disminuir paulatinamente el tiempo y la pureza de CO₂ al instante de conexión de los tanques fermentadores a la línea de recolección. Conociendo las especificaciones técnicas de la torre purificadora con las que cuenta la planta de CO₂ (puede recibir como mínimo gas que contenga un 0,1% de O₂), los tanques se comenzaron a subir a la línea con 99,30% de pureza de CO₂, valor que tiene 0,3 como margen de operación sin generar ninguna anomalía en el proceso de purificación.

La tabulación de los datos obtenidos, permitió describir por medio de una gráfica el extracto real y la pureza en función del tiempo, al inicio de la fermentación. Siguiendo lo anterior, se concluyó que los tanques fermentadores de 2700hl se deben conectar a las 8 horas después de ser llenados y los de 1800hl a las 10 horas, realizando una verificación previa de la pureza de CO₂. Los resultados pertinentes y la gráfica de generación (con su ecuación respectiva) se muestran en las tablas 5 y 6 en las figuras 4 y 5.

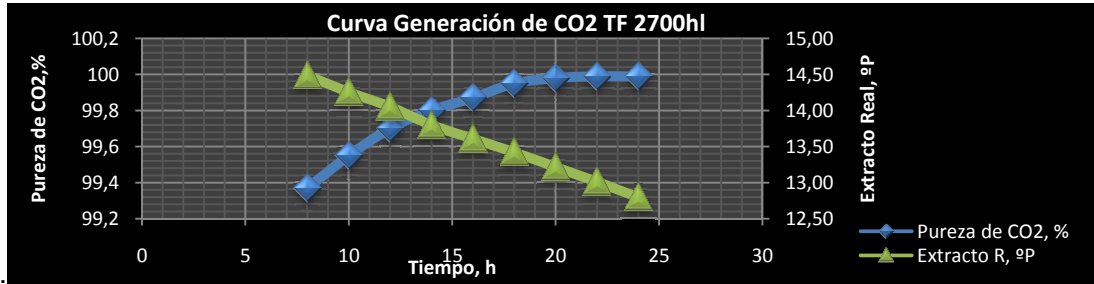
Tabla 5. Relación de pureza de CO₂, extracto real, extracto aparente y tiempo después de llenado, para determinar los valores de la curva de generación de los tanques de 1800hl y 2700hl.

VALORES CURVA DE GENERACIÓN DE CO ₂ , TF 1800hl				VALORES CURVA DE GENERACIÓN DE CO ₂ , TF 2700hl			
Teimpo después de llenado, h	Pureza de CO ₂ , %	Extracto Apa, °P	Extracto Real, °P	Teimpo después de llenado, h	Pureza de CO ₂ , %	Extracto Apa, °P	Extracto R, °P
8	*	14,92	15,12	8	99,37	14,15	14,48
10	99,03	14,61	14,86	10	99,55	13,87	14,26
12	99,38	14,29	14,60	12	99,7	13,62	14,05
14	99,55	14,04	14,39	14	99,8	13,31	13,80
16	99,74	13,76	14,16	16	99,87	13,08	13,61
18	99,83	13,47	13,93	18	99,95	12,85	13,42
20	99,94	13,11	13,63	20	99,98	12,6	13,21
22	99,99	12,91	13,47	22	99,99	12,35	13,01
24	99,99	12,66	13,26	24	99,99	12,09	12,80

*Valor fuera del rango de medición.

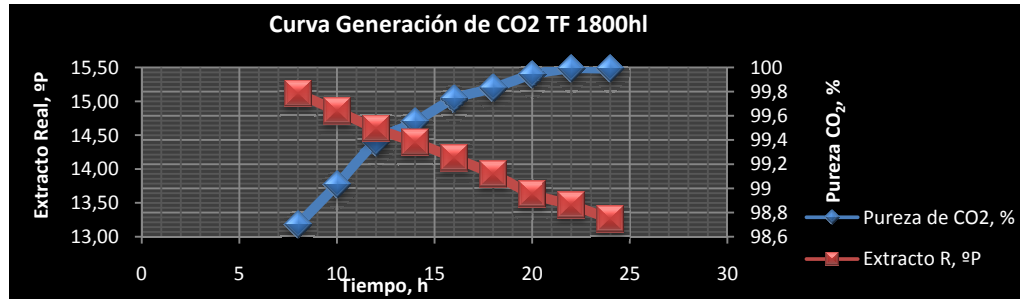
Fuente: Autor

Figura 4. Curva de generación de CO₂ y ecuación de pureza para tanques de 2700hl. Tiempo vs pureza, tiempo vs extracto real



Fuente: Elaborado por el autor.

Figura 5. Curva de generación de CO₂ y ecuación de pureza para tanques de 1800hl. Tiempo vs pureza, tiempo vs extracto real.



Fuente: Elaborado por el Autor.

Tabla 6. Kilogramos de CO₂ recuperados conectando los tanques de 2700hl y 1800hl a las 8 y 10 horas respectivamente.

GANANCIA DE CO ₂ EN TANQUES DE 1800hl									
Tiempo después de llenado	Extracto R, °P (%w/w)	Delta	kg CO ₂ *hl/kg mosto	Extracto R, kg extrc/kg Mosto	Densidad, g/cm ³	Densidad, kg/Hl	Extracto R, kg extrac/hl mosto	kg CO ₂	Diferencia de kg CO ₂ entre 19 horas y 22 horas
0	16	0,00	0,00	0,16	1,064	106,36	17,02	0,00	
10	14,86	1,14	820,80	0,15	1,056	105,60	15,69	927,64	
19	13,79	1,07	770,40	0,14	1,051	105,10	14,49	1790,51	863
GANANCIA DE CO ₂ EN TANQUES DE 2700hl									
Tiempo después de llenado	Extracto R, °P (%w/w)	Delta	kg CO ₂ *hl/kg mosto	Extracto R, kg extrc/kg Mosto	Densidad, g/cm ³	Densidad, kg/Hl	Extracto R, kg extrac/hl mosto	kg CO ₂	Diferencia de kg CO ₂ entre 19 horas y 22 horas
0	16	0,00	0,00	0,16	1,064	106,36	17,02	0,00	
8	14,48	1,52	1641,60	0,14	1,055	105,50	15,28	1852,41	
17	13,51	0,97	1047,60	0,14	1,050	105,00	14,19	3022,60	1170

Fuente: Autor

Este nuevo ensayo, muestra una recuperación de CO₂ mucho mayor que la obtenida en primera instancia. Cerca 900kg para tanques de 1800hl y más de 1100kg para tanques de 2700hl se recuperan (ampliando de manera significativa la existencia de CO₂). Los nuevos tiempos de conexión al igual que las purezas de CO₂, estarán consignados en la documentación que hará parte del estándar de generación de CO₂ (que se encuentra en etapa de aprobación).

3.2.2. CURVA DE ATENUACIÓN.

3.2.2.1. ESTIMATIVO DE CO₂ GENERADO POR LOS TANQUES FERMENTADORES DE LA CERVECERÍA.

Definidos los valores estándares para la conexión de los tanques, se comenzaron a realizar las pruebas para determinar la cantidad de CO₂ generado por los de tanques (dos tipos) existentes en la cervecería. En esta etapa de la práctica, se aplicó la misma metodología implementada para hallar el tiempo y pureza de CO₂ antes de ser conectado el tanque.

Cumplido el tiempo para conectar los tanques a la planta, se procedió a la realización de ensayos, cuyo objetivo fue determinar la curva de atenuación del extracto en el tanque fermentador. Tomando como tiempo inicial la conexión, se recolectaron muestras cada 12 horas hasta que el tanque cumpliera el ciclo de producción de CO₂ (aprox. 5 días). Los datos obtenidos de las muestras y la cantidad de CO₂ generado se muestran en las tablas 7 y 8. El número de muestras realizado para este procedimiento se encuentran en el anexo 2.

Tabla 7. Valores pruebas realizadas para hallar la atenuación del extracto.

VALORES DE ATENUACIÓN DEL EXTRACTO TF 1800HL						VALORES DE ATENUACIÓN DEL EXTRACTO TF 2700HL					
Tiempo después de Conexión, h	Extracto Real, °P	Extracto Apa, °P	Alcohol, v/v %	Alcohol, w/w, %	Densidad, g/cm ³	Tiempo después de Conexión, h	Extracto Real, °P	Extracto Apa, °P	Alcohol, v/v %	Alcohol, w/w, %	Densidad, g/cm ³
21	12,26	11,47	2,24	1,53	1,04420	21	11,61	10,69	2,61	1,98	1,04096
33	11,22	10,15	3,02	2,29	1,03875	33	10,56	9,36	3,41	2,50	1,03214
45	10,30	9,01	3,68	2,81	1,03402	45	8,87	7,31	4,46	3,42	1,02712
57	8,92	7,33	4,52	3,47	1,02720	57	7,70	5,81	5,36	4,15	1,02257
69	7,81	5,93	5,35	4,13	1,02154	69	6,75	4,65	5,96	4,63	1,01542
81	6,82	4,73	5,94	4,61	1,01675	81	6,53	4,37	6,14	4,77	1,01533
93	6,77	4,64	6,04	4,69	1,01639	93	6,26	4,04	6,31	4,91	1,01462
105	6,50	4,33	6,18	4,80	1,01516	105	6,05	3,79	6,42	5,00	1,01301
CONEXIÓN REALIZADA A LAS 10 DESPUÉS DE LLENAR EL TANQUE						CONEXIÓN REALIZADA A LAS 8 DESPUÉS DE LLENAR EL TANQUE					

Fuente: Autor.

Tabla 8. Valor estimado del CO₂ producido por los tanques fermentadores de la cervecería, según valores del estándar de generación.

PRODUCCIÓN DE CO ₂ EN TANQUES DE 1800hl									
Tiempo después de llenado	Extracto R, °P (%w/w)	Delta	kg CO ₂ *hl/kg mosto	Extracto R, kg extrc/kg Mosto	Densidad, g/cm ³	Densidad, kg/Hl	Extracto R, kg extrac/hl mosto	kg CO ₂	kg CO ₂
0	16	0,00	0,00	0,16	1,064	106,36	17,02	0,00	
10	13,79	2,21	1591,20	0,14	1,051	105,10	14,49	1790,51	
115	6,50	7,29	5248,80	0,07	1,015	101,50	6,60	7475,41	5685
PRODUCCIÓN DE CO ₂ EN TANQUES DE 2700hl									
Tiempo después de llenado	Extracto R, °P (%w/w)	Delta	kg CO ₂ *hl/kg mosto	Extracto R, kg extrc/kg Mosto	Densidad, g/cm ³	Densidad, kg/Hl	Extracto R, kg extrac/hl mosto	kg CO ₂	kg CO ₂
0	16	0,00	0,00	0,16	1,064	106,36	17,02	0,00	
8	13,51	2,49	2689,20	0,14	1,050	105,00	14,19	3022,60	
113	6,05	7,46	8056,80	0,06	1,013	101,30	6,13	11723,45	8701

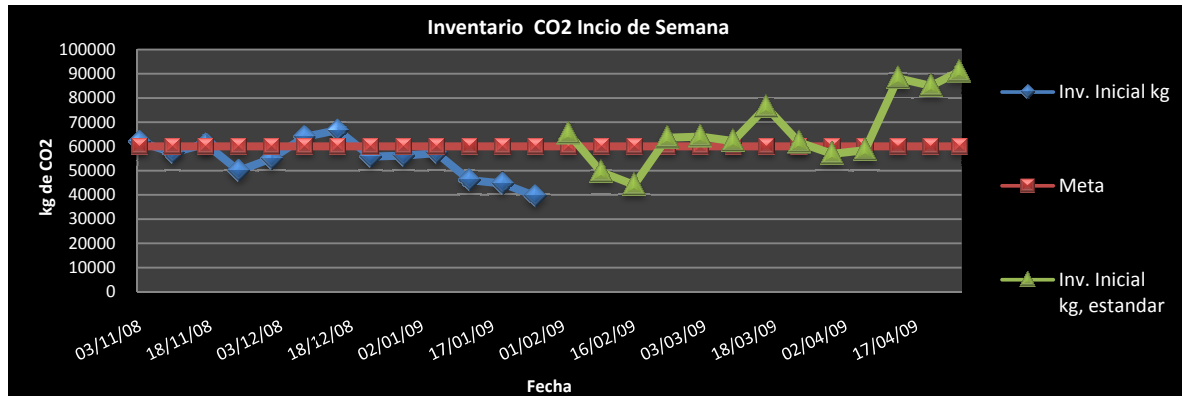
Fuente: Autor

Con las modificaciones y los cálculos realizados, se obtuvo los kilogramos teóricos generados de CO₂ y la ganancia en la recolección. No obstante, existen factores que no garantizan el procesamiento de todo el gas que la fermentación genera. La planta purificadora de gas, tiene una eficiencia $\geq 70\%$ y según la literatura cerca del 15%^[9] del gas generado se pierde debido a accesorios (lo que representa poco más de 3,5 toneladas en los tanques grandes y cerca de 2,3 toneladas para los tanques de 1800hl.)

3.2.3. EXISTENCIA DE CO₂.

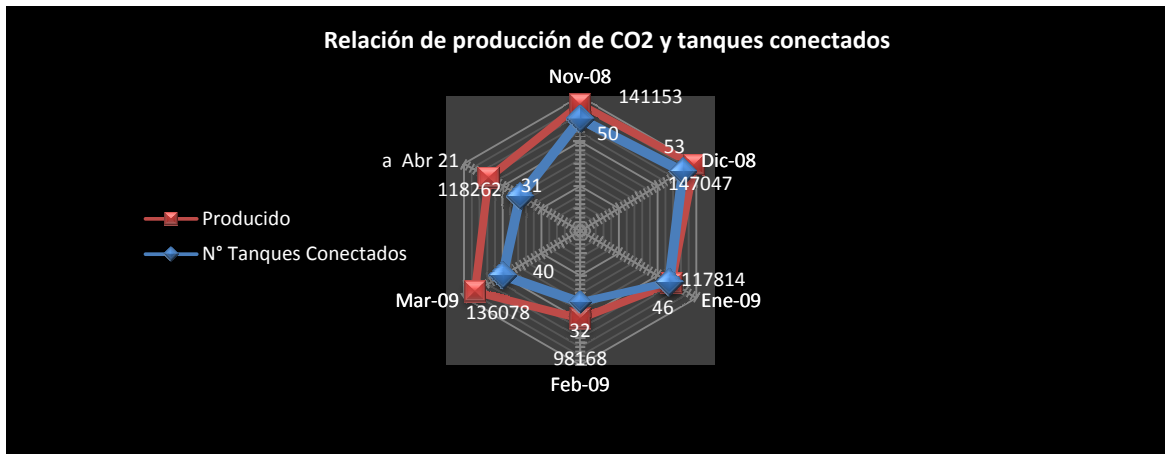
Antes de febrero de 2009, la cervecera tenía tres tanques de almacenamiento de CO₂ con una capacidad máxima de 22t cada uno. A partir de mediados de febrero se puso en funcionamiento un tanque adicional, con el que se incrementó la capacidad de la planta a 90 toneladas, aumentando el procesamiento de gas. Los 1000kg adicionales que se comenzaron a recuperar, han incrementado los niveles de existencia de la cervecera a 90t después de marzo, manteniendo un promedio de 65t semanales. La disminución de los tiempos de recolección del instructivo de fermentación, se refleja en la existencia y en montos económicos para la compañía. En las figuras 6 y 7, se muestran el cambio producido en la existencia de CO₂ en la cervecera a partir de marzo de 2009.

Figura 6. Inventarios de CO₂ desde el 3 de noviembre de 2008 hasta el 27 de abril de 2009. La meta de existencia es superior a las 60t. La línea verde representa la existencia después de implementar el estándar.



Fuente: Elaborado por el Autor.

Figura 7. Relación de la producción de CO₂ mensual vs los tanques conectados mes a mes.



Fuente: Elaborado por el Auto.

En la figura 7 refleja el incremento del gas por número de tanques conectados mes a mes. La mejora, inició en el mes de febrero, mes en el que se implementó la disminución del tiempo de conexión a 8 y 10 horas. Esto se evidencia comparando la cantidad de tanques conectados y la generación de estos en los meses de enero y abril, este último presenta mayor generación aún cuando la cantidad de tanques conectados es menor, indicando que la disminución del tiempo y pureza de CO₂ para la recolección de gas ha sido eficiente.

La utilización del gas generado como elemento de regulación, representa un valor agregado de la disminución del tiempo de conexión, haciendo un control indirecto a la espuma producida en la fermentación, ya que el tanque estará expuesto a la presión de la línea más rápidamente, logrando que la espuma no alcance a sobrepasar la cámara vacía del tanque.

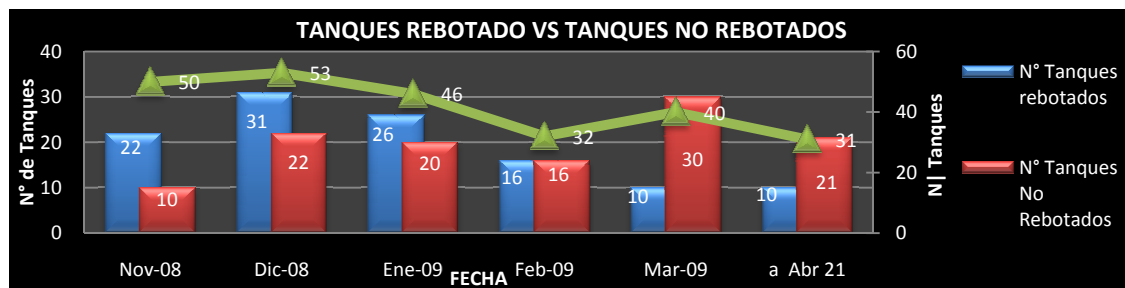
3.3. REBOTES DE ESPUMA, CONTRAPRESIONES DE LÍNEA DE RECOLECCIÓN Y TANQUES FERMENTADORES Y ESTÁNDAR DE CONEXIÓN.

El rebote de espuma (fenómeno espontáneo en la fermentación) se controlaba con las trampas de espuma, que se encuentran distribuidas a lo largo de la línea de

recolección. Eventualmente la espuma llegaba a la planta de recolección, deteniendo el proceso de purificación hasta que la espuma cesara de llegar. Haciendo la trazabilidad de los rebotes, se identificaron cambios súbitos de presión al interior del tanque, que en ocasiones alcanzaban deltas de presión de 15 psi. Al conectar los tanques a la línea de recolección, las variaciones de esta se ven reflejadas inmediatamente en la presión interna del fermentador.

Con el aporte del personal operativo y profesional del área, se concluyó que existía la necesidad de implementar una válvula reguladora de presión, que trabajara automáticamente al detectar incrementos de presión en la línea. El accesorio se instaló para ser operado por el personal de elaboración, ya que esta área no contaba con un mecanismo para controlar la presión de la línea si existían fluctuaciones. Esta tarea sumada a las dos anteriores, permitieron realizar un control más exhaustivo a los rebotes críticos de espuma. Los resultados son notables, el seguimiento realizado desde el mes de noviembre de 2008 a abril de 2009 permite observar una reducción paulatina de los rebotes, alcanzando más de un 50% de tanques no rebotados comparado con el 31% que se venía presentando, cumpliendo el objetivo de regular la presión de la línea y la presión interna de los fermentadores, reduciendo la pérdida de espuma del producto final. La figura 8 muestra los eventos de rebotes de espuma. En el anexo 2 muestra las tendencias de la presión de la línea de recolección antes y después de implementar el sistema de alivio.

Figura 8. Comportamiento tanques rebotados vs. tanques no rebotados.



Fuente: elaborado por el Autor.

3.3.1. ESTÁNDAR DE RECOLECCIÓN DE CO₂.

La realización del estándar se basó en recopilar los conocimientos de cada operario, con el fin de crear un documento donde estuvieran consignadas las mejores prácticas para la conexión de los tanques fermentadores a la planta de recolección. El estándar se encuentra en etapa de evaluación y aprobación. En este se describió paso a paso, por medio de una metodología gráfica, las operaciones que se deben realizar al momento que las condiciones establecidas en el estudio de generación de CO₂ las haya alcanzado un tanque fermentador. El documento, cuenta también con el procedimiento a realizar cuando se presenta un rebote de espuma al igual de la frecuencia de realizar CIP (Clean in Place) a la línea de recolección.

Esto expone de manera concreta, que el trabajo interdisciplinario realizado durante esta práctica, permite enfocar aquellos puntos del proceso donde existen opciones de mejora, para desarrollar una documentación estructurada, con la participación de todo el personal del área, para implementación del estándar de fermentación.

Los resultados resaltan el incremento de la existencia de CO₂, un control en el llenado de los tanques fermentadores, una presión de la línea más estable y un personal capacitado en lo referente a la generación de CO₂.

4. CONCLUSIONES.

Basados en datos y hechos, se logró recopilar información acerca del proceso de generación de CO₂ para lograr un mejoramiento de este. La pureza de CO₂ alcanzada para conectar un tanque fermentador a la planta se redujo en 9 horas, traduciendo esto en una conexión más rápida y un aumento en la existencia de CO₂ en la compañía. La presión de la línea presenta un comportamiento estable, garantizando que la presión interna de los tanques sea la adecuada y disminuyendo la frecuencia de rebotes considerables de espuma.

El estudio realizado beneficia la reducción de emisiones de gas carbónico al ambiente, ya que los tanques antes de su conexión, son puestos a una línea de venteo mientras alcanza la pureza requerida. Este gas de venteo representa la tonelada adicional de CO₂ que la cervecería está recuperando.

Hoy, la cervecería de Bucaramanga cuenta con documentación sobre la generación de CO₂ que se incluirá en el estándar de fermentación, que permite implementar un proceso de capacitación al operario, con el objetivo de mostrar las mejoras realizadas e incentivar a identificar otras, aumentando la productividad en las actividades desarrolladas por la empresa.

Después de hallar los valores para la conexión de los tanques a la planta de CO₂, se incrementaron las existencias en la cervecería de 50t semanales promedio a 65t, lo que asegura a la cervecería su disponibilidad y evita incurrir en su compra.

5. RECOMENDACIONES.

Mejorar los canales de comunicación entre las áreas de fermentación y sala de máquinas por medio del uso del radio, correo interno o teléfono con el fin de evitar cambios en el proceso.

Diligenciar un formato para que se lleve conjuntamente entre las dos áreas, donde se encuentre la cantidad de tanques conectados, la pureza a la cual se conectó, los tanques que se rebotaron y el tiempo que duró el tanque generando CO₂.

Con las ecuaciones de generación halladas, se debe crear una alarma, que este en función del tiempo. Esta alarma debe indicar al caverero que se puede realizar una conexión de un tanque fermentador. Para esto es necesario que el supervisorio, marque como tiempo de inicio, el momento en que se recibe el último cocimiento.

Realizar un seguimiento a los consumos generados en la cervecería con el fin de identificar posibles desperdicios del gas y encontrar opciones de mejora para el proceso.

6. BIBLIOGRAFÍA.

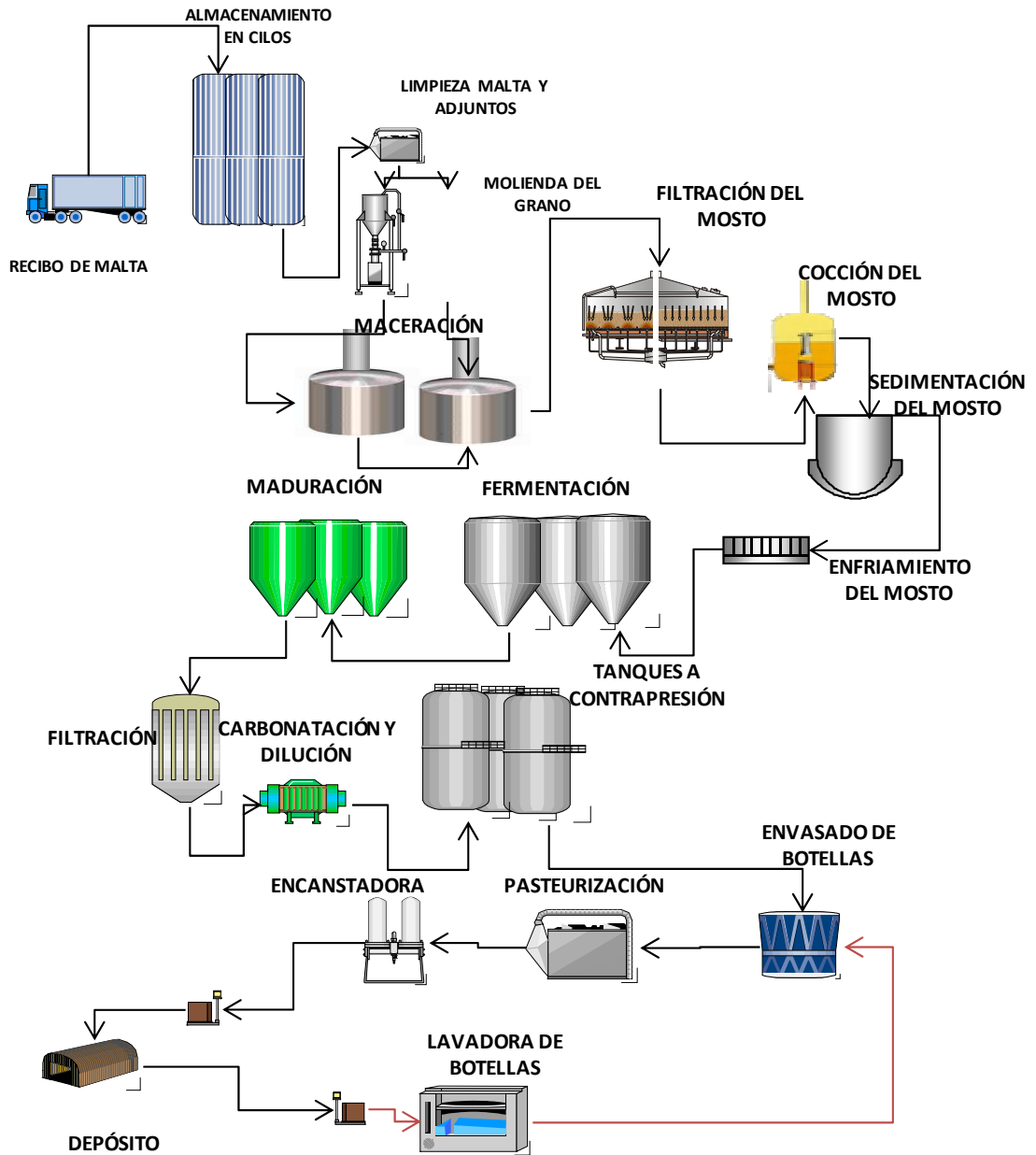
- [1]. INSTITUTO RENAULT, *QC-Story Manual de Presentación del Método*. Grupo Empresarial BAVARIA, G.E.B, Primea Versión, 14 de marzo de 2003. p 6
- [2]. BAVARIA S.A, *Sistema de Recolección y Distribución de CO₂*, División de Control de Calidad. G.E.B, Santa Fe de Bogotá, 2002. p 1-6.
- [3]. CHINOME BARRERA, Jesús, *Proceso de Maltería*, Gerencia de producción. Maltería de Tibito. Octubre 2004. p 1-15.
- [4]. BAVARIA S.A., *II Seminario de Actualización en Tecnología Cervecera*. Universidad Católica de LOVAINE (Bélgica),Cartagena 2004.
- [5]. D.E. Briggs, J.S. Hough, R. Stevens and T.M. Young, *Malting and Brewing Science*. Springer, Segunda edición 1990. p. 15-37; 222-250.
- [6].VICEPRESIDENCIA DE MANUFACTURA, *Transporte, Recibo, almacenamiento y Molienda de Malta*. Grupo Empresarial BAVARIA. Santa Fe de Bogotá, Noviembre de 2004. p 3-30
- [7].VICEPRESIDENCIA DE MANUFACTURA, *Elaboración de Mosto*. Grupo Empresarial BAVARIA, Santa Fe de Bogotá, Noviembre de 2004. p 5-45.
- [8]. VICEPRESIDENCIA DE MANUFACTURA, *Maceración, Filtración, Cocción y Enfriamiento de Mosto*, Grupo Empresarial BAVARIA, Santa Fe de Bogotá, Noviembre de 2004.

- [9]. KLIMOVITZ, R. and W. BAMFORTH , C, *El Cerveceros En La Práctica*. Master Brewers Association of the Americas, Segunda Edición 2002. p 300-350; 550-560.
- [10]. VICEPRESIDENCIA DE MANUFACTURA, *Fermentación*. Grupo Empresarial BAVARIA, Santa Fe de Bogotá, Noviembre de 2004. p 2-60
- [11]. GARCÍA GARIBAY, Mariano, QUINTERO RAMÍREZ, Rodolfo y LÓPEZ MUNGÍA, Agustín, *Bioteología Alimentaria*. Limusa 2002 México. p 273-287.
- [12]. HARDWICK, William A., *Handbook of Brewing*, Illustrated Edition. Marcel Dekker Inc. ,1995 New York. p 323-353.
- [13]. PRIEST, F. G. and STEWART, Graham G., *Handbook Of Brewing*. Edition: 2, illustrated Publicado por CRC Press, 2006. p 490-510.
- [14]. VICEPRESIDENCIA DE MANUFACTURA, *Maduración*. Grupo Empresarial BAVARIA, Santa Fe de Bogotá, Noviembre de 2004. p 6-20.
- [15] VICEPRESIDENCIA DE MANUFACTURA, *Filtración*. Grupo Empresarial BAVARIA, Santa Fe de Bogotá, Noviembre de 2004. p 3-36.
- [16]. VICEPRESIDENCIA DE MANUFACTURA, *Envase*, Grupo Empresarial BAVARIA, Santa Fe de Bogotá, Noviembre de 2004.
- [17]. WONDERWARE Factory Suite, Intouch™. Invensy Systems, Inc. 2002. [Software].
- [18]. WONDERWARE® Factory Suite™. WonderWare Corporation. 1999. [Software].

- [19]. ANTON PAAR, *DMA 35n Desnsity-Specific Gravity-Concentration Meter*. Anton Paar Company[Manual del Usuario].
- [20]. BAVARIA, *Determinación de Extractos y Alcohol*. Gerencia de Aseguramiento de Calidad. 2008 [Instructivo 05-001999].
- [21]. ANTON PAAR, *DMA 4500 Desnsity Meter*. Anton Paar Company [Manual del Usuario].
- [22]. ANTON PAAR, *DMA 35n Alcoalyzer Plus*. Anton Paar Company. [Manual del Usuario].
- [23]. BAVARIA, *Medición Pureza de CO₂*, Gerencia de Aseguramiento de Calidad. 2004 [Instructivo 05-000107].
- [24]. BAVARIA, *Fermentación del Mosto y Trasiego Fermentación-Maduración*, fabricar cervezas, refajos y bebidas de malta. 2006 [Instructivo 02-000483].

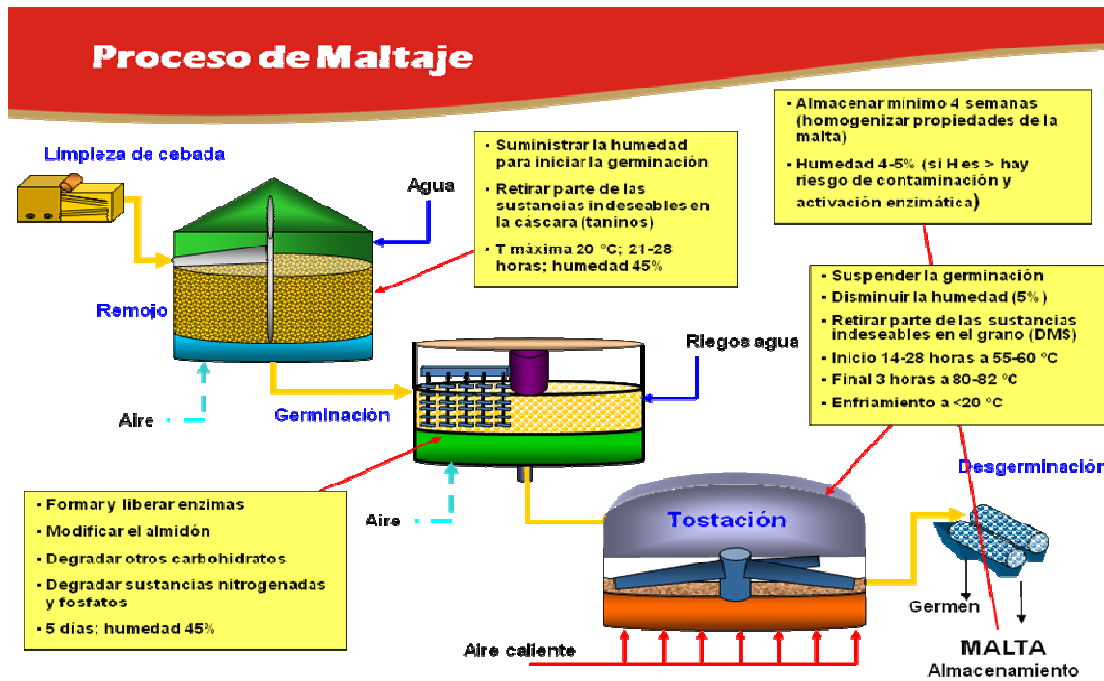
ANEXO 1. PROCESO CERVECERO-DIAGRAMAS DE PROCESO.

Figura 9. Proceso general de la elaboración de cerveza.



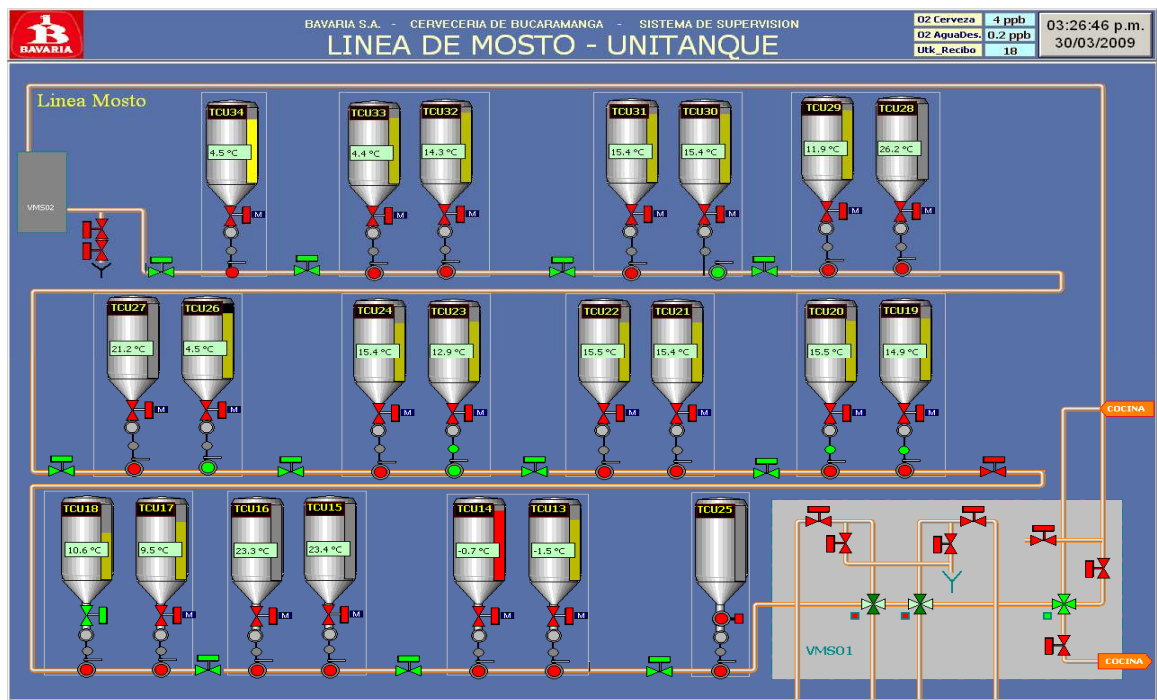
Fuente: Autor.

Figura 10. Descripción del proceso de maltaje.

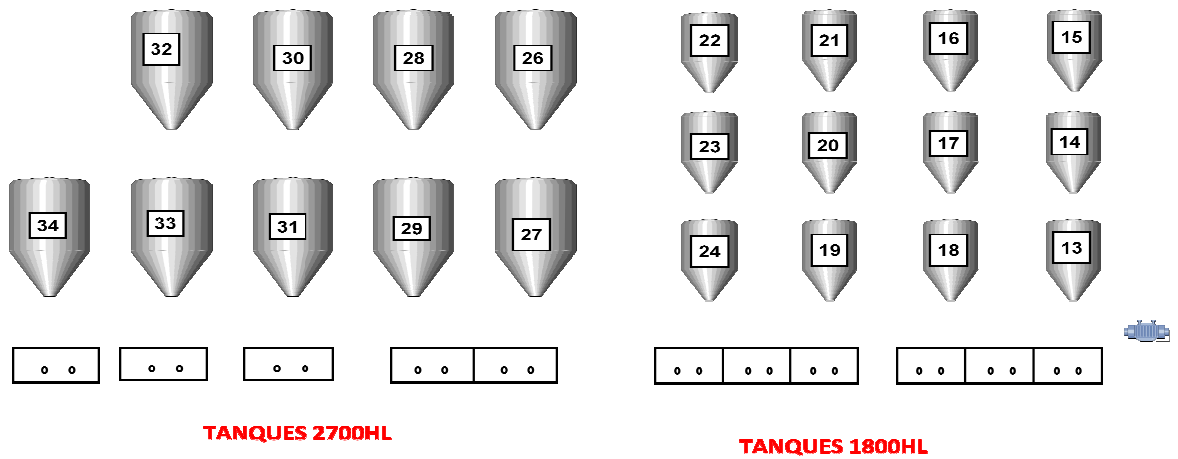


Fuente: Suministrado por la cervecera de Bucaramanga.

Figura 11. a) Panel supervisorio de la línea de mosto. b) Distribución de los tanques fermentadores.

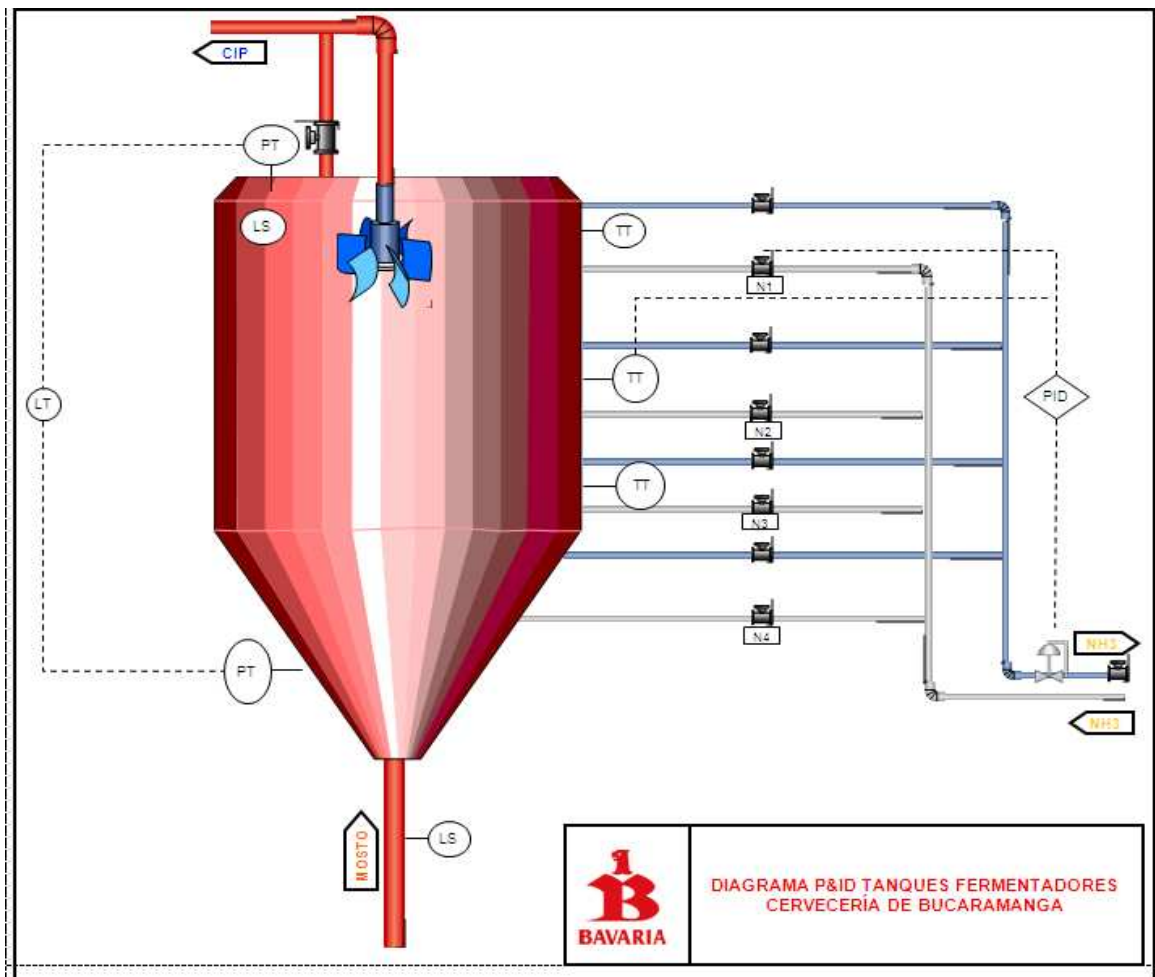


a) (Fuente: Suministrado por el Departamento de Producción cervecera de Bucaramanga.)



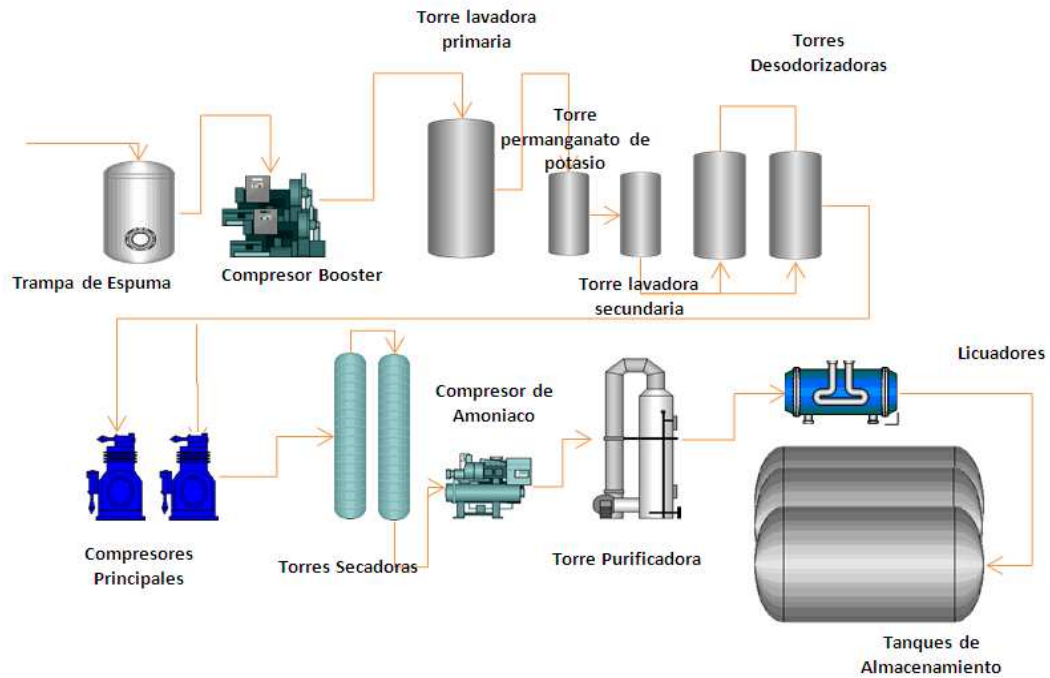
b)(Fuente: Elaborado por el Autor).

Figura 12 Diagrama P&ID de los tanques fermentadores.

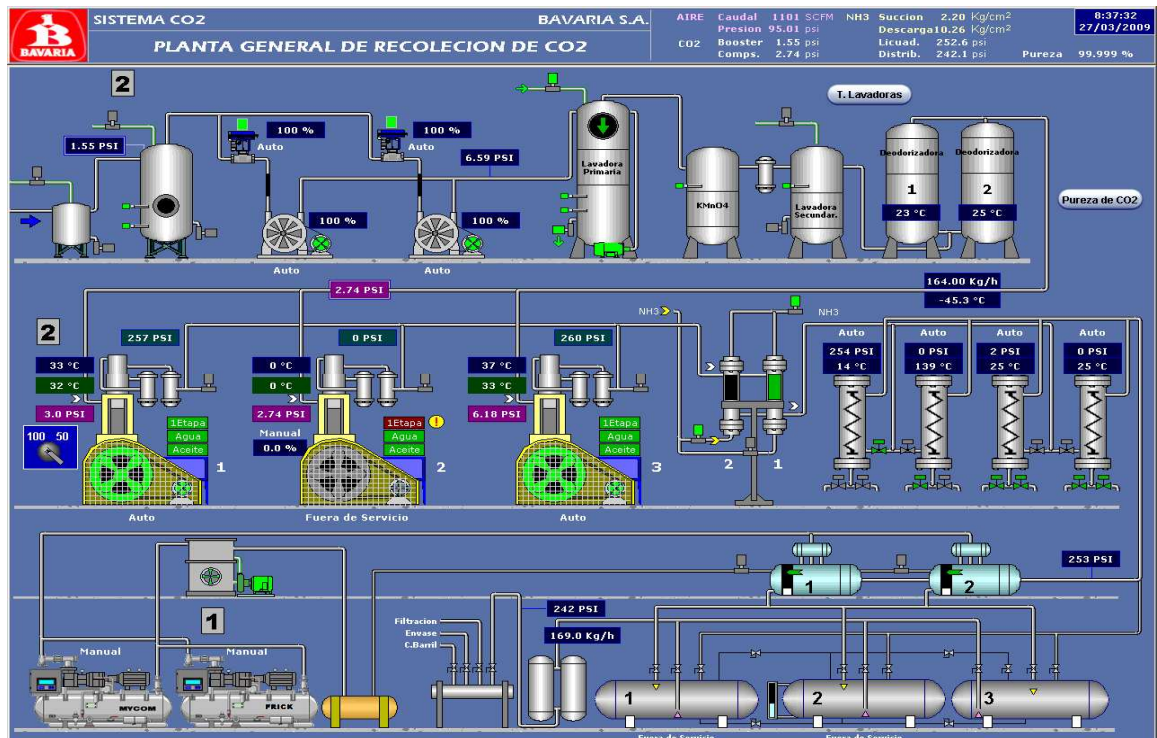


Fuente: Elaborado por el Autor.

Figura 13. Supervisorio sala de máquinas y esquema planta de purificadora de CO₂.



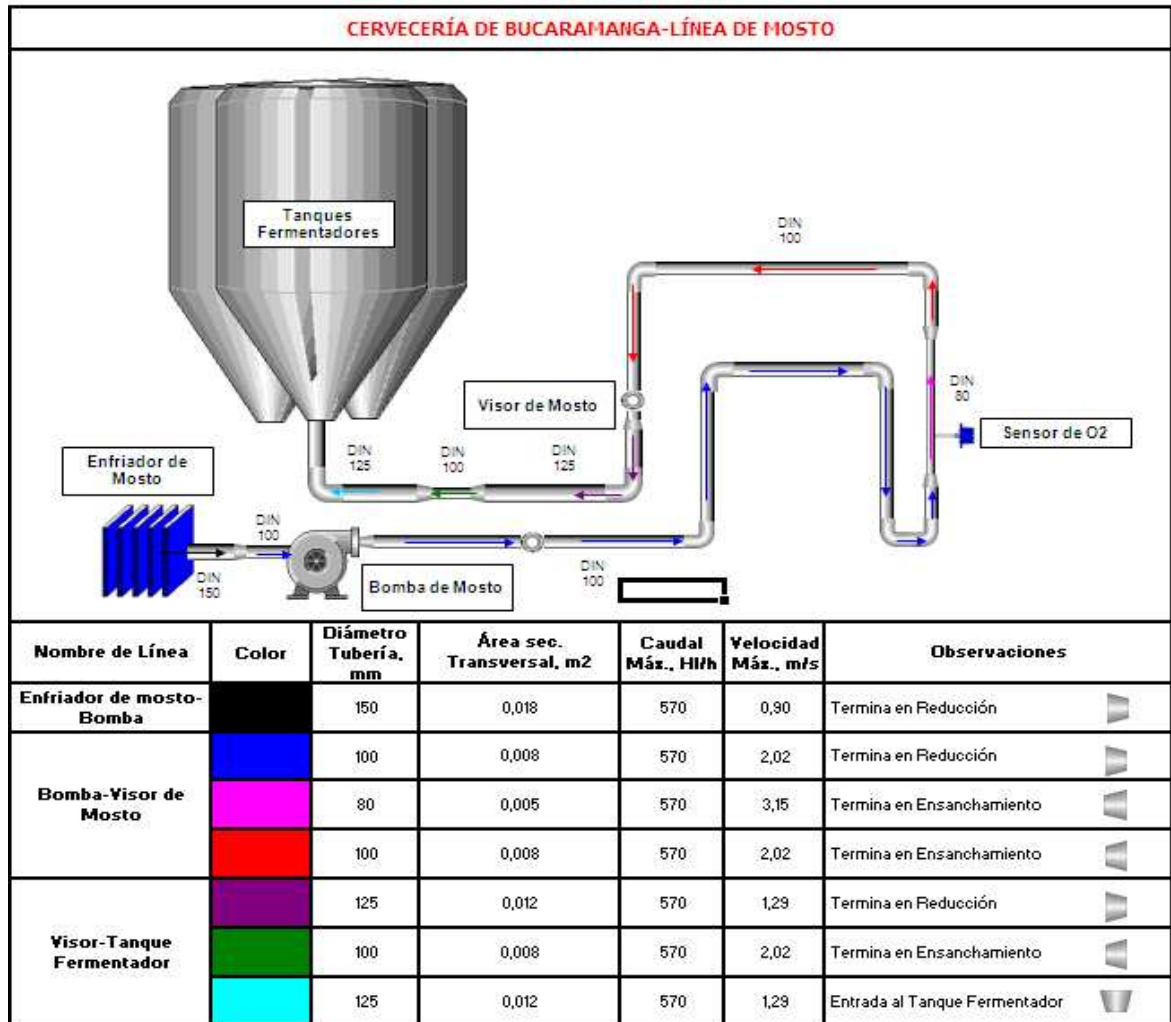
Fuente: Elaborado por el Autor.



Fuente: Suministrado por el Departamento de Servicios Industriales Cervecería de Bucaramanga.

Anexo 2. Generalidades de los Resultados y Análisis de Datos.

Figura 14. Característica de la línea de mosto.



Fuente: Elaborado por el Autor.

Tabla 9. Valores obtenidos de las pruebas realizadas a los tanques fermentadores de la cervecería de Bucaramanga para hallar la curva de generación de CO₂. Las horas mostradas son el tiempo transcurrido después de haber recibido el último cocimiento para cada tanque.

TANQUES FERMENTADORES DE 1800 hl												
12 Horas			14 Horas			16 Horas			18 Horas			
Pureza, %	Extracto Apa, °P	Extracto Real, °P	Pureza, %	Extracto Apa, °P	Extracto Real, °P	Pureza, %	Extracto Apa, °P	Extracto Real, °P	Pureza, %	Extracto Apa, °P	Extracto Real, °P	
99,5	14,14	14,48	99,6	14	14,36	99,7	13,82	14,21	99,8	13,56	14,00	
99,55	14,18	14,51	99,45	14,34	14,64	99,85	13,71	14,12	99,85	13,42	13,89	
99,4	14,35	14,65	99,45	14,25	14,57	99,65	14,04	14,39	99,75	13,79	14,19	
99,2	14,51	14,78	99,6	13,81	14,21	99,7	13,52	13,97	99,9	13,35	13,83	
99,2	14,42	14,71	99,6	13,95	14,32	99,8	13,77	14,17	99,8	13,42	13,89	
99,4	14,1	14,44	99,5	14,02	14,38	99,7	13,8	14,20	99,9	13,3	13,79	
99,3	14,5	14,77	99,65	13,97	14,34	99,8	13,7	14,12				
99,5	14,19	14,52										
Prom.	99,38	14,30	14,61	99,55	14,05	14,40	99,74	13,77	14,17	99,83	13,47	13,93
Desv.	0,14	0,17	0,14	0,08	0,18	0,15	0,07	0,16	0,13	0,06	0,18	0,15
Máx.	99,55	14,51	14,78	99,65	14,34	14,64	99,85	14,04	14,39	99,90	13,79	14,19
Min.	99,20	14,10	14,44	99,45	13,81	14,21	99,65	13,52	13,97	99,75	13,30	13,79
Nº Datos	8	8	8	7	7	7	7	7	7	6	6	6

TANQUES FERMENTADORES DE 1800 hl									
20 Horas			22 Horas			24 Horas			
Pureza, %	Extracto Apa, °P	Extracto Real, °P	Pureza, %	Extracto Apa, °P	Extracto Real, °P	Pureza, %	Extracto Apa, °P	Extracto Real, °P	
99,95	13,2	13,71	99,99	12,97	13,52	99,99	12,71	13,30	
99,9	13,03	13,57	99,99	12,82	13,39	99,99	12,61	13,22	
99,99	13,11	13,63	99,99	12,96	13,51				
Prom	99,95	13,11	13,64	99,99	12,92	13,47	99,99	12,66	13,26
Desv	0,05	0,09	0,07	0,00	0,08	0,07	0,00	0,07	0,06
Max	99,99	13,20	13,71	99,99	12,97	13,52	99,99	12,71	13,30
Min	99,90	13,03	13,57	99,99	12,82	13,39	99,99	12,61	13,22
Nº Datos	3	3	3	3	3	3	2	2	2

Fuente: Autor.

TANQUES FERMENTADORES DE 2700 hl												
12 Horas			14 Horas			16 Horas			18 Horas			
Pureza, %	Extracto Apa, °P	Extracto Real, °P	Pureza, %	Extracto Apa, °P	Extracto Real, °P	Pureza, %	Extracto Apa, °P	Extracto Real, °P	Pureza, %	Extracto Apa, °P	Extracto Real, °P	
99,70	13,55	13,99	99,80	13,32	13,80	99,90	13,09	13,62	99,99	12,65	13,26	
99,70	13,69	14,11	99,80	13,23	13,73	99,80	13,20	13,71	99,90	12,96	13,51	
			99,80	13,40	13,87	99,90	12,92	13,48	99,90	13,01	13,55	
						99,90	13,14	13,66	99,99	12,82	13,39	
									99,99	12,84	13,41	
Prom	99,70	13,62	14,05	99,80	13,32	13,80	99,88	13,09	13,61	99,95	12,86	13,42
Desv	0,00	0,10	0,08	0,00	0,09	0,07	0,05	0,12	0,10	0,05	0,14	0,11
Max	99,70	13,69	14,11	99,80	13,40	13,87	99,90	13,20	13,71	99,99	13,01	13,55
Min	99,70	13,55	13,99	99,80	13,23	13,73	99,80	12,92	13,48	99,90	12,65	13,26
Nº Datos	2	2	2	3	3	3	4	4	4	5	5	5

TANQUES FERMENTADORES DE 2700 hl									
20 Horas			22 Horas			24 Horas			
Pureza, %	Extracto Apa, °P	Extracto Real, °P	Pureza, %	Extracto Apa, °P	Extracto Real, °P	Pureza, %	Extracto Apa, °P	Extracto Real, °P	
99,99	12,53	13,16	99,99	12,29	12,96	99,99	12,31	12,98	
99,99	12,44	13,08	99,99	12,48	13,12	99,99	11,87	12,62	
99,95	12,81	13,39	99,99	12,28	12,95				
99,99	12,64	13,25							
Prom	99,98	12,61	13,22	99,99	12,35	13,01	99,99	12,09	12,80
Desv	0,02	0,16	0,13	0,00	0,11	0,09	0,00	0,31	0,25
Max	99,99	12,81	13,39	99,99	12,48	13,12	99,99	12,31	12,98
Min	99,95	12,44	13,08	99,99	12,28	12,95	99,99	11,87	12,62
Nº Datos	4	4	4	3	3	3	2	2	2

Fuente: Autor.

Tabla 10. Valores obtenidos de las pruebas realizadas a los tanques fermentadores de la cervecería de Bucaramanga para hallar la curva de atenuación de CO₂. Las horas mostradas son el tiempo transcurrido después de haber conectado el tanque.

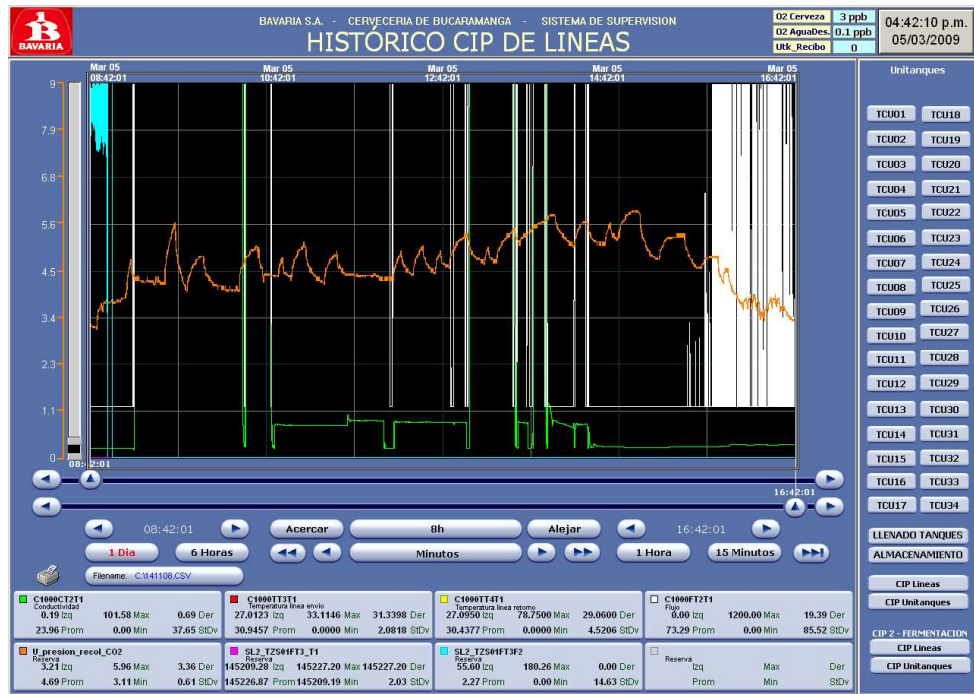
TANQUES FERMENTADORES DE 1800HL												
21			33			45			57			
Extracto Real, °P	Extracto Apa, °P	Densidad	Extracto Real, °P	Extracto Apa, °P	Densidad	Extracto Real, °P	Extracto Apa, °P	Densidad	Extracto Real, °P	Extracto Apa, °P	Densidad	
12,77	12,11	1,0469	11,24	10,15	1,0387	10,02	8,63	1,0325	9,15	7,59	1,0260	
12,45	11,70	1,0452	11,01	9,90	1,0377	10,59	9,38	1,0356	9,11	7,65	1,0258	
11,64	10,75	1,0412	11,29	10,25	1,0392				8,65	6,98	1,0285	
12,17	11,32	1,0435	11,33	10,31	1,0394				8,94	7,30	1,0271	
									9,02	7,45	1,0277	
									8,67	7,03	1,0283	
Max	12,77	12,11	1,0469	11,33	10,31	1,0394	10,59	9,38	1,0356	9,15	7,65	1,0285
Min	11,64	10,75	1,0412	11,01	9,90	1,0377	10,02	8,63	1,0325	8,65	6,98	1,0258
Prom	12,26	11,47	1,0442	11,22	10,15	1,0388	10,30	9,01	1,0340	8,92	7,33	1,0272
Dest	0,48	0,58	0,0024	0,15	0,18	0,0008	0,40	0,53	0,0022	0,22	0,28	0,0011
69			81			93			105			
Extracto Real, °P	Extracto Apa, °P	Densidad	Extracto Real, °P	Extracto Apa, °P	Densidad	Extracto Real, °P	Extracto Apa, °P	Densidad	Extracto Real, °P	Extracto Apa, °P	Densidad	
7,57	5,64	1,0204	6,76	4,66	1,0165	6,60	4,42	1,0155	6,47	4,35	1,0153	
7,39	5,40	1,0194	6,71	4,60	1,0162	6,86	4,72	1,0167	6,57	4,39	1,0151	
8,53	6,83	1,0212	6,91	4,82	1,0171	6,84	4,69	1,0166	6,49	4,33	1,0154	
7,75	5,84	1,0252	6,75	4,60	1,0176	6,82	4,76	1,0169	6,46	4,22	1,0152	
			6,88	4,77	1,0169	6,59	4,40	1,0154	6,53	4,37	1,0147	
			6,94	4,94	1,0162	6,85	4,75	1,0168				
						6,82	4,76	1,0169				
Max	8,53	6,83	1,0252	6,94	4,94	1,0176	6,86	4,76	1,0169	6,57	4,39	1,0154
Min	7,39	5,40	1,0194	6,71	4,60	1,0162	6,59	4,40	1,0154	6,46	4,22	1,0147
Prom	7,81	5,93	1,0215	6,82	4,73	1,0167	6,77	4,64	1,0164	6,50	4,33	1,0152
Dest	0,50	0,63	0,0025	0,10	0,13	0,0005	0,12	0,16	0,0006	0,05	0,06	0,0003

Fuente: Autor.

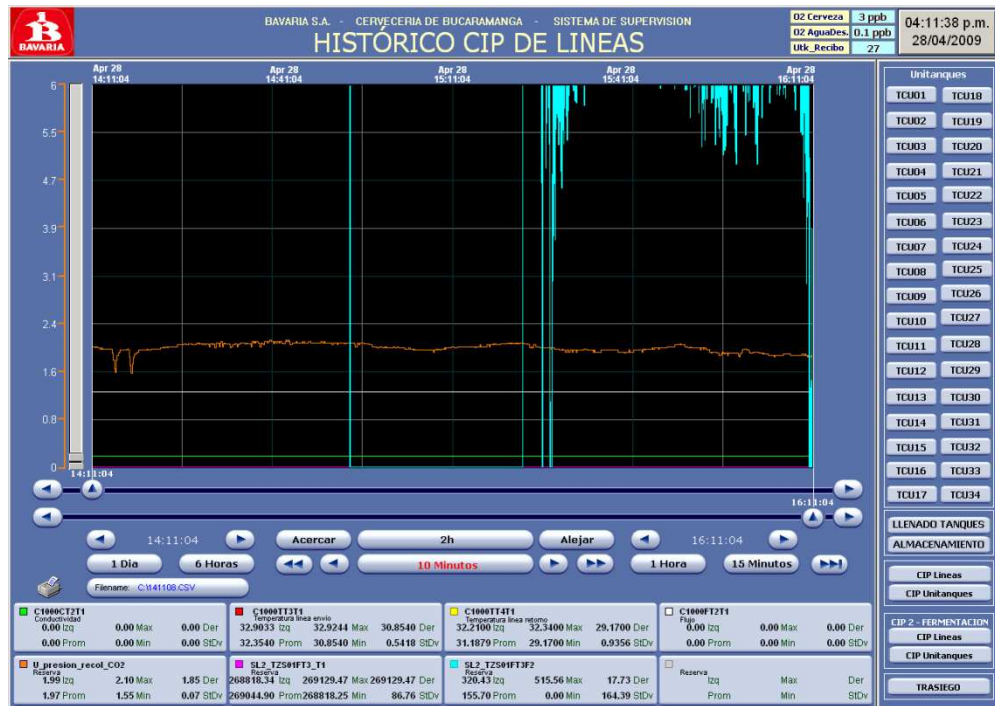
TANQUES FERMENTADORES DE 2700HL												
	21			33			45			57		
	Extracto Real, ep	Extracto Apa, ep	Densidad	Extracto Real, ep	Extracto Apa, ep	Densidad	Extracto Real, ep	Extracto Apa, ep	Densidad	Extracto Real, ep	Extracto Apa, ep	Densidad
	12,77	12,11	1,0469	11,24	10,15	1,0387	10,02	8,63	1,0325	9,15	7,59	1,0260
	12,45	11,70	1,0452	11,01	9,90	1,0377	10,59	9,38	1,0356	9,11	7,65	1,0258
	11,64	10,75	1,0412	11,29	10,25	1,0392				8,65	6,98	1,0285
	12,17	11,32	1,0435	11,33	10,31	1,0394				8,94	7,30	1,0271
										9,02	7,45	1,0277
										8,67	7,03	1,0283
Max	12,77	12,11	1,0469	11,33	10,31	1,0394	10,59	9,38	1,0356	9,15	7,65	1,0285
Min	11,64	10,75	1,0412	11,01	9,90	1,0377	10,02	8,63	1,0325	8,65	6,98	1,0258
Prom	12,26	11,47	1,0442	11,22	10,15	1,0388	10,30	9,01	1,0340	8,92	7,33	1,0272
Dest	0,48	0,58	0,0024	0,15	0,18	0,0008	0,40	0,53	0,0022	0,22	0,28	0,0011
	69			81			93			105		
	Extracto Real, ep	Extracto Apa, ep	Densidad	Extracto Real, ep	Extracto Apa, ep	Densidad	Extracto Real, ep	Extracto Apa, ep	Densidad	Extracto Real, ep	Extracto Apa, ep	Densidad
	7,57	5,64	1,0204	6,76	4,66	1,0165	6,60	4,42	1,0155	6,47	4,35	1,0153
	7,39	5,40	1,0194	6,71	4,60	1,0162	6,86	4,72	1,0167	6,57	4,39	1,0151
	8,53	6,83	1,0212	6,91	4,82	1,0171	6,84	4,69	1,0166	6,49	4,33	1,0154
	7,75	5,84	1,0252	6,75	4,60	1,0176	6,82	4,76	1,0169	6,46	4,22	1,0152
				6,88	4,77	1,0169	6,59	4,40	1,0154	6,53	4,37	1,0147
				6,94	4,94	1,0162	6,85	4,75	1,0168			
							6,82	4,76	1,0169			
Max	8,53	6,83	1,0252	6,94	4,94	1,0176	6,86	4,76	1,0169	6,57	4,39	1,0154
Min	7,39	5,40	1,0194	6,71	4,60	1,0162	6,59	4,40	1,0154	6,46	4,22	1,0147
Prom	7,81	5,93	1,0215	6,82	4,73	1,0167	6,77	4,64	1,0164	6,50	4,33	1,0152
Dest	0,50	0,63	0,0025	0,10	0,13	0,0005	0,12	0,16	0,0006	0,05	0,06	0,0003

Fuente: Autor.

Figura 15. Fluctuaciones línea de Recolección de CO₂. a) comportamiento oscilatorio. b) comportamiento normal.



a) (Fuente: Suministrado por Departamento de Producción).



b) (Fuente: Suministrado por Departamento de Producción).

Anexo 3. Ecuaciones Para el Desarrollo Experimental

Lista de Ecuaciones:

Caudal $Q = v \cdot S$ (3)

Donde: Q= caudal (hl/h); v= velocidad (m/s); S= sección transversal (m²)

Superficie $S = \pi \cdot \frac{D^2}{4}$ (4)

Donde: D= diámetro de la tubería (mm)

Volumen $V = l \cdot S$ (5)

Donde: V= volumen (hl); l= longitud de la tubería (m).

Tiempo $t = l/v$ (6)

Donde: t= tiempo (s).

Ecuación de Balling.^[2]

$$kg CO_2 = 0,4 \frac{kg CO_2}{kg extracto} \cdot \left[P_o \cdot \left(\frac{260}{260 - P_o} \right) - P_f \cdot \left(\frac{260}{260 - P_f} \right) \right] \cdot volumen\ tanque\ (7).$$

Donde: (0,40), (kg CO₂/kg extracto); P_o= Extracto inicial (kg extracto/100 kg de extracto); P_f=Extracto final (kg extracto/100 kg de extracto).

La expresión (260 / (260- P)) nos permite determinar la densidad del mosto en Kg/L.