

INTEGRACIÓN DE LA PROGRAMACIÓN DE LA PRODUCCIÓN Y EL PLAN DE LIMPIEZAS DE EQUIPOS EN UN PROCESO DE FILTRACIÓN DE CERVEZA

WILLIAM ALEXANDER ÁGREDO BOLAÑOS

Documento presentado a:

Programa de Maestría en Ingeniería Industrial énfasis en Ingeniería Industrial
modalidad profundización como requisito para optar por el título de Magister en
Ingeniería

Director:

Cristiam Andrés Gil Gonzales Ph. D

Director:

Juan Pablo Orejuela Cabrera Ph. D

Escuela de Ingeniería Industrial

Facultad de Ingeniería



Cali – Valle del Cauca

Agosto 2021

RESUMEN

En el presente trabajo se plantea una propuesta de planeación de producción de una empresa cervecera de la región mediante un modelo matemático desarrollado en software especializado. Debido a ciertos inconvenientes que se presentan en la compañía en indicadores de proceso, se pretende que los resultados del modelo demuestren gráficamente la posibilidad de mejorar algunos tiempos de procesamiento e integrar el plan de limpiezas para garantizar la calidad de los productos.

Palabras clave: Programación de producción, scheduling, plan de limpiezas, proceso cervecero.

ABSTRACT

In this paper, a production planning for a brewing company in the region is proposed using a mathematical model developed in specialized software. Due to certain drawbacks that arise in the company in process indicators, it is intended that the results of the model graphically demonstrate the possibility of improving some processing times and integrate the cleaning plan to guarantee the quality of the products.

Keywords: Production scheduling, scheduling, cleaning plan, brewing process.

AGRADECIMIENTOS

Expreso aquí mis más sinceros agradecimientos a quienes me dieron todo su apoyo para lograr tan magna meta que me propuse años atrás y que con mucho esfuerzo he logrado llevar a cabo a pesar de todas las situaciones de orden nacional y global, que causaron un repentino cambio en las rutinas de actividades en todos los ámbitos de la vida pero que con gran tenacidad logramos sobrellevar. Honro a mis padres, hermana y esposa Janeth Katherine Pinzón a quien siempre estuvo conmigo desde el principio en este camino acompañándome de manera incondicional y dándome ánimo para culminar este proyecto. Agradezco enormemente a mis tutores Cristiam Gil y Juan Pablo Orejuela por todo su apoyo en este proceso y por compartir conmigo un poco de esos conocimientos que dominan con gran destreza y servir de maestros en este campo de la ingeniería. Por último, quiero agradecer a la escuela de ingeniería y todos sus profesores que siempre estuvieron dispuestos con su apoyo en las diferentes asignaturas y contribuir con mi formación académica.

Contenido

RESUMEN.....	2
ABSTRACT.....	2
AGRADECIMIENTOS	3
1. INTRODUCCIÓN.....	8
2. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA.....	11
2.1 Antecedentes del problema.....	11
2.2 Descripción detallada del problema.....	11
2.3 Pregunta de investigación	17
2.4 Objetivo general.....	17
2.5 Objetivos específicos.....	17
3. MARCO DE REFERENCIA	17
3.1 Marco teórico.....	17
3.1.1 Proceso de planeación	19
3.1.2 El scheduling dentro del proceso de planeación	21
3.2 Revisión de la literatura.....	24
4. PROPUESTA METODOLÓGICA.....	26
4.1 Caracterización del proceso.....	26
4.2 Definición del modelo matemático	28
4.2.1 Descripción del modelo.....	28
4.2.2 Conjuntos	29
4.2.3 Parámetros.....	30
4.2.4 Variables.....	30
4.2.5 Restricciones.....	31
4.3 Caso de estudio	38
4.3.1 Conjunto de categorías.....	38
4.3.2 Conjunto de productos.....	38
4.3.3 Conjunto de lotes.....	39
4.3.4 Conjunto de tipos de proceso	39
4.3.5 Conjunto de máquinas	39
4.3.6 Conjunto de procesos siguientes y procesos anteriores.....	40
4.3.7 Parámetros de flujo de las líneas de envasado.....	41

4.3.8	Parámetros de demanda.....	41
4.3.9	Parámetros de capacidad de tanques.....	42
5.	RESULTADOS Y ANÁLISIS.....	43
5.1	Variable de decisión Y_{in}	43
5.2	Variable de decisión X_{pminjo}	43
6.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	49
7.	BIBLIOGRAFÍA	51

Tabla de contenido de figuras

Figura 1 Diagrama general del proceso cervecero. Adaptado de (Esslinger, 2015) .	12
Figura 2 Gráfico Índice Microbiológico Cervezas. Autor.....	13
Figura 3 Gráfico Índice Microbiológico Bebidas de Malta. Autor.	14
Figura 4 Gráfico de cumplimiento de aseos en sistema de agua. Autor.	15
Figura 5 Diagrama general del sistema de agua carbonatada. Autor.	16
Figura 6 Dependencia entre planificación y control entre empresa y subsistema de producción. Adaptado de (Machuca & Dominguez, Jose Antonio, Dominguez, Miguel, García, Santiago, Ruiz, 1994)	20
Figura 7 Diagrama general del proceso a modelar. Autor.....	26
Figura 8 Diagrama simplificado del proceso a modelar. Autor.	27
Figura 9 Resultados variables s y e de la marca M6. Autor	45
Figura 10 Programa de M14 flujo normal. Autor.....	46
Figura 11 Programa de M14 con saturación en el equipo. Autor	46
Figura 12 Programa de M13 flujo normal. Autor.....	47
Figura 13 Programa de M13 con disminución de flujo en envase	47
Figura 14 Programa general de Maltas. Autor.....	48
Figura 15 Programa general de Cervezas. Autor	48

Tabla de contenido de Tablas

Tabla 1 Flujo envase de maltas según formato. Autor.	28
Tabla 2 Flujo de envase cervezas según máquina. Autor.	28
Tabla 3 Resultados variable Y_{in} . Autor	43
Tabla 4 Resultados de la variable X_{pminjo} . Autor	44
Tabla 5 Resultados variable Z_{pmin} . Autor	44
Tabla 6 Resultados variables s y e para marca M6. Autor	45

1. INTRODUCCIÓN

La planeación de la producción en los sectores manufactureros es de gran necesidad debido a que con un plan establecido se asignan los recursos necesarios de materia prima, mano de obra, energía y fluidos que se requieren para llevar a cabo el proceso de fabricación. Cualquiera que sea la naturaleza de éste, es necesario en el campo de la ingeniería industrial buscar la optimización dependiendo de las condiciones y factores que puedan estar presentes en la gestión de la planeación.

La industria cervecera se caracteriza por ser compleja debido a que cuenta con diversos procesos térmicos, largos tiempos de espera, gestión de recursos naturales y energéticos, entre otros. Sin embargo, existe un proceso muy particular en el cual se está a la merced de un microorganismo que es muy importante en este campo, la levadura cervecera es crucial porque es la encargada de convertir los azúcares del mosto en alcohol y generar dióxido de carbono (Alfonso, Vivas, & Roza, 2004) lo cual toma varios días en llevarse a cabo; por lo tanto, es muy complejo generar un programa de producción donde esté presente un proceso biológico por las inesperadas variaciones en el comportamiento de la levadura, sin embargo, es necesario crear programas de producción con la suficiente versatilidad de soportar tales cambios y no afectar en gran medida la planeación de los procesos posteriores.

Un proceso de planeación en este tipo de industria debe adaptarse a las necesidades de la planta, no existe un estándar de producción para todas las plantas cerveceras en el mundo, cada una es distinta debido a que está afectada hasta por las condiciones climáticas de la zona en que se encuentre ubicada y esto hace que la planeación sea personalizada. Por ello es necesario contar con un equipo multidisciplinario con suficientes conocimientos del proceso y a su vez de la modelación matemática mediante herramientas y softwares especializados que permitan organizar y personalizar un plan de producción a cada planta.

Las grandes compañías cerveceras en el mundo cuentan con softwares especializado para la planeación de producción sin embargo, se ha evidenciado en muchos casos

que esta planeación normalmente es imposible llevarla a cabo debido a que la naturaleza del proceso hace que se salga de control por cambios en las necesidades del mercado o fallas en los equipos, normalmente se genera un plan con un horizonte de una semana y en esa misma semana se deben hacer cambios para modificar algunos tiempos de proceso y evitar mayores efectos adversos en las demás etapas.

La gran necesidad de realizar una planeación que involucre el plan de limpiezas radica en que de esa forma se garantizan los estándares de calidad de los productos que llegan a manos del consumidor no solo en el aspecto sensorial sino también en la inocuidad del mismo. Por lo tanto, es necesario que tanto la productividad como limpiezas sean de manera conjunta.

En el presente trabajo se pretende proponer un modelo matemático para la planeación de producción de una planta cervecera de la región, dado que la compañía cuenta con ciertos indicadores que utilizan para medir su desempeño, se ha venido evidenciando un impacto en los valores de estos indicadores. Haciendo un estudio más profundo del tema, se ha observado que hay ciertas falencias en la planeación de producción, en la cual se incumplen unos planes de limpieza con que debe contar el proceso, por lo tanto, es necesario desarrollar un plan de producción que permita incluir estos tiempos de limpieza.

Los tiempos de producción normalmente tienen en cuenta los productos que se van a producir de cada una de las diferentes marcas, sin embargo, las brechas de tiempo no son suficientes debido a los cambios constantes que hay en la planeación y se omiten este tipo de limpiezas, por lo tanto, hay unos indicadores que se han venido afectando debido a estos cambios severos que presentan.

Durante el desarrollo del modelo se establece una metodología usando programación entera mixta MIP que consiste en el análisis del proceso completo y observar detalladamente cuales son las etapas que han sido afectadas por el plan de limpieza que se incumple, por lo tanto, al hacer un análisis profundo en general, se evalúan todos los parámetros, variables y restricciones con que cuenta el proceso para así

definir una serie de especificaciones que se deben cumplir durante el desarrollo del modelo.

Luego de desarrollar el modelo, éste se somete a una serie de escenarios variando ciertas condiciones del proceso, simulando ciertas fallas que se puedan presentar para ver cómo responde este modelo, luego se ejecuta el modelo con las condiciones nominales y luego determinar un plan de producción general, con los datos que arroje dicho modelo se hace un análisis de los resultados y se buscan las brechas de tiempo en las cuales se puedan ejecutar las limpiezas que se requieren.

También se hace una revisión de la literatura de ciertos artículos con investigaciones en los que se han trabajado temas similares o del mismo campo y finalmente se formulan conclusiones y recomendaciones de acuerdo al modelo empleado y los posibles estudios futuros como para mejorar los resultados de dicho modelo y poder mejorar el desempeño de la empresa.

2. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

2.1 Antecedentes del problema

Existe una gran variedad de indicadores que evalúan el desempeño de los procesos manufactureros y se ajustan de tal forma que sea posible la visualización de las oportunidades de mejora mediante las tendencias y desviaciones que presenten dichos indicadores.

La planta de manufactura en la que se desarrolla el presente documento cuenta con indicadores de desempeño del tipo KPI (Key Performance Indicator) en todas las áreas de la compañía, uno de estos es clave en el área de elaboración y consiste en la evaluación de las limpiezas de los equipos de la planta mediante los resultados de análisis microbiológicos de las muestras de producto en proceso.

La empresa fabrica dos clases de productos: cervezas y maltas. A cada una de estas clases se le evalúa un índice microbiológico separadamente debido a que los resultados se asignan a diferentes informes corporativos.

Durante el año fiscal 2019, se han presentado valores y tendencias en los índices microbiológicos por debajo de la meta que afectan los objetivos de la compañía, se presenta principalmente en la clase de producto maltas.

2.2 Descripción detallada del problema

La fabricación de la cerveza consta de cuatro materias primas principales: cebada, lúpulo, agua y levadura. El uso de la cebada se debe a su alto contenido de almidón, el lúpulo le da a la cerveza su característico sabor amargo y el aroma, el agua es la materia prima que está presente en mayor proporción en la cerveza, por lo tanto, su calidad es indispensable y la levadura es la responsable de la fermentación alcohólica del mosto (Kunze, 2006).

La Figura 1 representa el diagrama general del proceso cervecero desde el almacenamiento de la malta y sus adjuntos hasta el envasado.

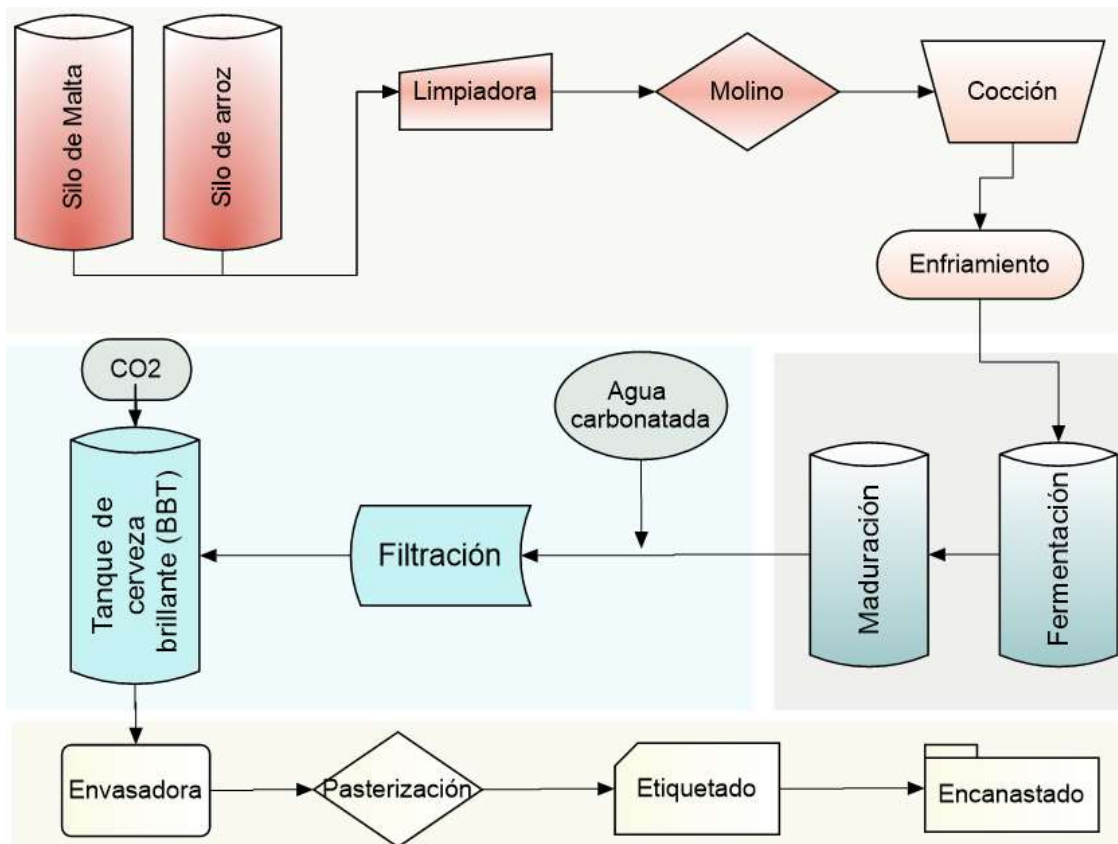


Figura 1 Diagrama general del proceso cervecero. Adaptado de (Esslinger, 2015)

El área de elaboración cuenta con diversos indicadores de proceso que permiten visualizar el desempeño de sus operaciones, entre ellos el ya mencionado índice microbiológico, el cual abarca los resultados microbiológicos en todas las etapas del proceso cervecero.

En la etapa de filtración de producto se realizan muestreos para análisis de laboratorio microbiológico a todas las corrientes de proceso que influyen directamente en el producto final: agua carbonatada, dióxido de carbono y producto concentrado. También se realizan análisis a las aguas de enjuague de tanques, filtros y líneas que también impactan en el valor final del KPI.

La Figura 2 representa el Índice Microbiológico de Cervezas con las tendencias de Filtración, el Total de Elaboración y el valor Total de Planta.

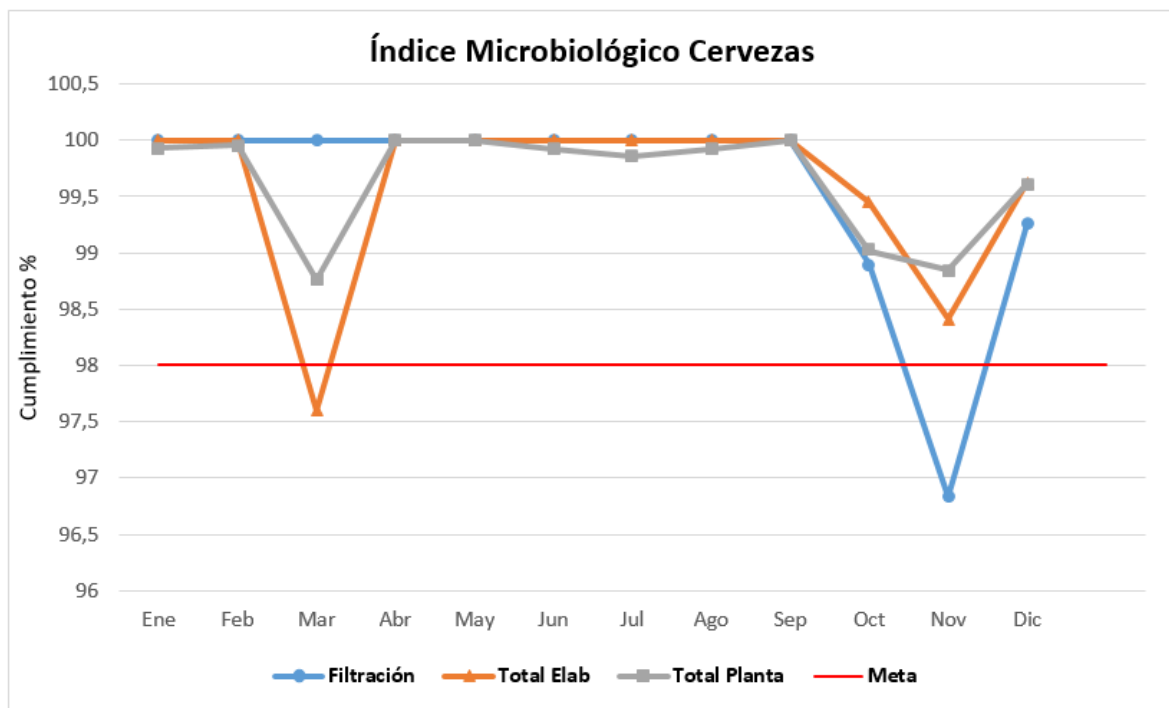


Figura 2 Gráfico Índice Microbiológico Cervezas. Autor.

En la Figura 2 se observa que el impacto en el valor total de la planta se debe a los valores de la etapa de filtración, en la cual se presentaron conteos microbiológicos en muestras de cervezas en tanques de cerveza brillante (BBT) generando resultados por debajo de la meta de la planta.

La Figura 3 representa el Índice Microbiológico de Maltas con las tendencias de Filtración, el Total de Elaboración y el valor Total de Planta.

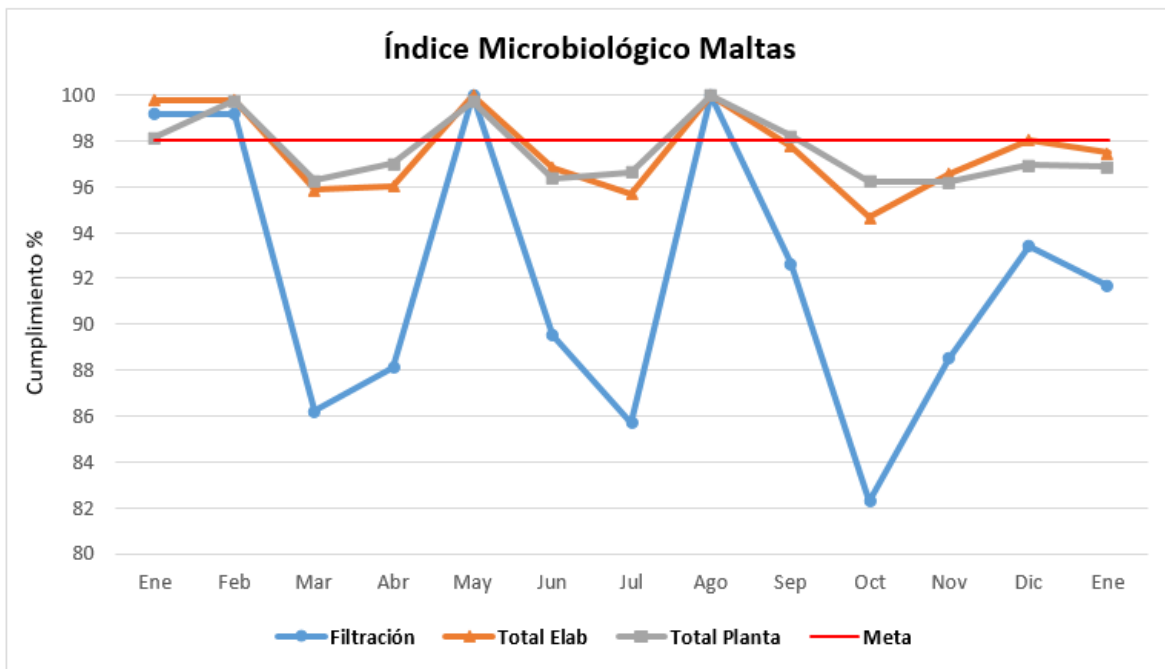


Figura 3 Gráfico Índice Microbiológico Bebidas de Malta. Autor.

En la Figura 3 se observa que los valores del indicador se ven afectados principalmente por la etapa de filtración, con datos que alcanzan mínimos de 82 % demostrando que existen problemas en dicha área en cuanto a la presencia de microorganismos en el producto en proceso, situación que podría causar producto no conforme en la bebida envasada y que por lo tanto debería darse de baja, generando pérdidas para la compañía y varios resultados por debajo de la meta de la planta.

Una posible razón para el impacto negativo en el indicador es el bajo cumplimiento de los aseos en el sistema de agua carbonatada como se observa en la Figura 4, la cual, por ser un indicador de aseos debería estar al 100% de cumplimiento para garantizar la limpieza completa de esta etapa.

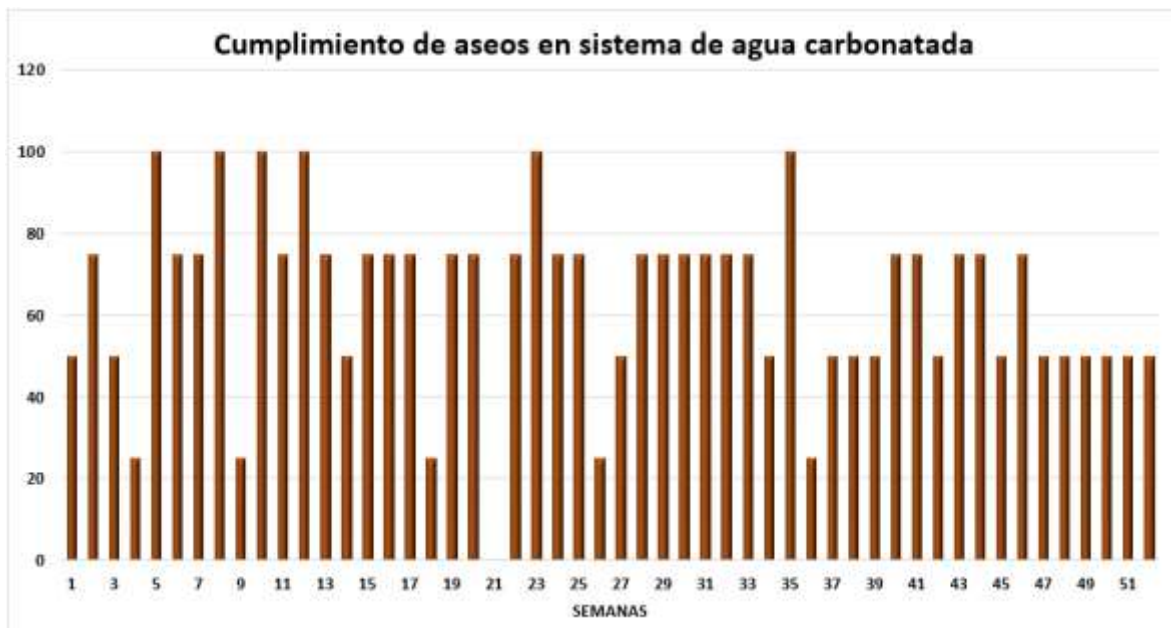


Figura 4 Gráfico de cumplimiento de aseos en sistema de agua. Autor.

El sistema de agua carbonatada como se muestra en la figura 5, consta de dos plantas de carbonatación, un bloque de tuberías de distribución y dos líneas que conducen el agua para la dilución del producto, cada uno de estos componentes requiere de un protocolo de limpieza que debe ejecutarse semanalmente según las políticas de la empresa. El componente que más se incumple con el aseo semanal es el bloque de tuberías de distribución, debido a que dicho procedimiento requiere de otras condiciones en otras partes del proceso, si alguno de estos requerimientos no se cumple, no es posible ejecutar el aseo al bloque de distribución.

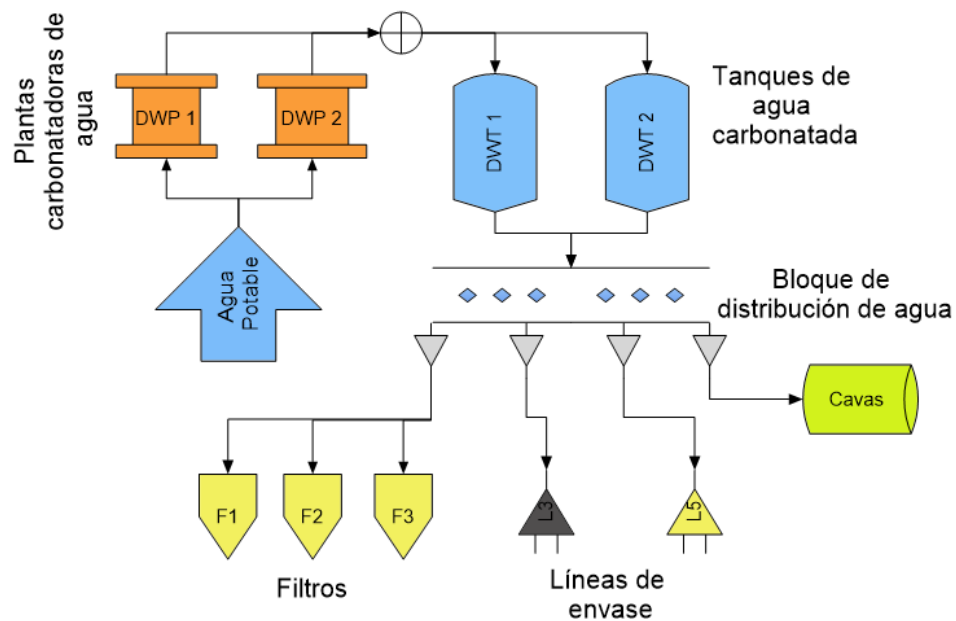


Figura 5 Diagrama general del sistema de agua carbonatada. Autor.

Las condiciones que se requieren para que sea posible realizar el aseo al bloque de tuberías de distribución son:

- ✓ El proceso de filtración debe estar fuera de servicio.
- ✓ La línea 5 de envase debe estar fuera de servicio debido a que dicha línea requiere agua carbonatada para el equipo de pasteurización.
- ✓ En el área de cavas no se debe estar iniciando ni finalizando procesos de trasiego, debido a que dicho proceso requiere agua para empujes de producto.
- ✓ La línea 3 no debe estar en arranque ni finalización debido a que también requieren de agua para empujes de producto.

2.3 Pregunta de investigación

¿Qué efectos podría tener la implementación de un programa de producción integral basado en un modelo matemático en el resultado del KPI de microbiología del área de filtración en un determinado periodo de tiempo?

2.4 Objetivo general

- ✓ Diseñar una estrategia para integrar la programación de la producción y el plan de limpiezas de equipos en un proceso de filtración.

2.5 Objetivos específicos

- ✓ Caracterizar el proceso de filtración analizando sus variables, parámetros y restricciones involucradas.
- ✓ Formular un modelo matemático que represente el problema planteado.
- ✓ Analizar los resultados del modelo matemático mediante la generación de escenarios.

3. MARCO DE REFERENCIA

3.1 Marco teórico

La optimización de procesos es una actividad constante en las industrias, por lo tanto, es necesario el uso de herramientas adecuadas que permitan dar solución a los diferentes problemas que se presentan, generalmente son situaciones muy puntuales debido a la naturaleza del proceso que se tenga a cargo. Una de las herramientas empleadas para mejoramiento es el scheduling, la cual, es muy útil en el campo de la manufactura de productos o de servicios y se trata principalmente en la asignación de recursos a determinadas tareas en periodos de tiempo definidos con el fin de optimizar uno o más objetivos normalmente de tiempo y dinero (Pinedo, 2016).

Cuando un problema involucra una gran cantidad de variables enteras o binarias, las metodologías de solución exacta resultan prohibitivas debido a la carga computacional que requiere, por lo tanto, se hace necesario recurrir a métodos alternativos que, aunque aparenten no poseer la rigurosidad matemática de los métodos exactos, están soportadas sobre una base matemática igualmente rigurosa, pero se encuentra distribuida y forma implícita en cada uno de los procedimientos que aplican (Gallego, Toro, & Escobar, 2015).

Un método heurístico es un procedimiento que trata de descubrir una solución muy buena pero no necesariamente una solución óptima a un problema dado. Un método con el correcto diseño puede proporcionar una solución muy cercana a la óptima empleando menos recursos tanto informáticos como de tiempo. Con frecuencia, se basan en ideas simples, de sentido común, en la cual el método se diseña para abordar un tipo específico de problema en vez de una variedad de aplicaciones (Hillier & Lieberman, 2010).

Actualmente, algunas industrias invierten en software especializado para ayudar a la programación de sus procesos las cuales cuentan con múltiples variables, la planta en la que se pretende realizar el presente proyecto, cuenta con el software Optiplant, la cual cuenta con un algoritmo especializado para el proceso cervecero; el usuario, que en este caso es un profesional con amplios conocimientos en la planta, introduce en el software parámetros tales como volumen requerido, tipos de marca, tiempos de mantenimiento, tiempos de limpieza, entre otros, para al final generar un programa tipo diagrama de Gantt que es interpretado y ejecutado por los operadores de la planta (Spieckermann & Stobbe, 2012).

3.1.1 Proceso de planeación

Según varios autores la planificación empresarial tiene tres fases básicas las cuales describen los siguiente

Planificación estratégica: donde se estable los objetivos y estrategias globales a largo plazo, la cual se ocupa de problemas de gran magnitud para ellos se utilizan variables muy agregadas. Esta planificación es a largo plazo entre tres a cinco años

Planificación operativa: es donde se concreta los planes estratégicos y los objetivos globales para cada área y subárea funcionales, es así como las tareas se desarrollan para que se cumplan los objetivos y planes a largo plazo. El tiempo de esta es relativamente corto va de 18 meses a un año.

Planificación adaptiva: es la que pretende establecer las medidas correctoras necesarias para eliminar las posibles divergencias entre los resultados y los objetivos relacionados con ellos.

Según otros autores existe un intermedio la cual es la fase de planificación denominada táctico o de medio plazo el cual tiene como misión fundamental conectar las características de las planificaciones anteriores, para así elaborar un programa detallado de lo que debe realizarse en cada unidad operativa en muy corto plazo (Machuca & Dominguez, Jose Antonio, Dominguez, Miguel, García, Santiago, Ruiz, 1994).

La Figura 6 representa lo mencionado anteriormente de manera gráfica.

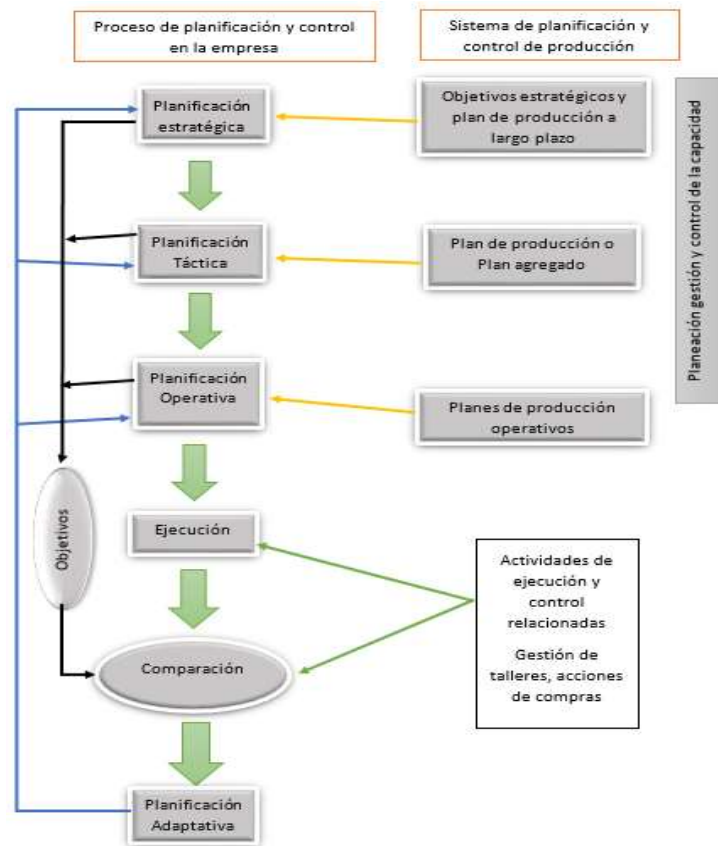


Figura 6 Dependencia entre planificación y control entre empresa y subsistema de producción. Adaptado de (Machuca & Dominguez, Jose Antonio, Dominguez, Miguel, García, Santiago, Ruiz, 1994)

Todo proceso de planeación debe llevar un enfoque jerárquico, para lo cual hay numerosas formas, aunque la esencia siempre es la misma, este enfoque se realiza con cinco fases:

- ✓ Planificación estratégica: el cual está conformado por el plan de ventas, el plan de producción y el plan financiero.
- ✓ Planificación táctica o a medio plazo: está conformada por el plan de producción y el plan de capacidad.
- ✓ Programación maestra: en el cual se realizarán análisis aproximado de la capacidad en el cual se tendrán en cuenta las necesidades derivadas de las actividades de la elaboración de productos terminados.

- ✓ Programación de componentes: programación detallada de los componentes que integran los distintos productos y la planificación detallada de la capacidad requerida por los mismos.
- ✓ Ejecución y control: esto se traduce por un lado en programación de operaciones en los centros de trabajo que tengan en cuenta las prioridades de fabricación y por otro lado las acciones de compra de las materias primas y de los componentes que se adquieran en el exterior.

3.1.2 El scheduling dentro del proceso de planeación

Teniendo en cuenta que en esta sección se proporciona antecedentes para los problemas, modelos y algoritmos de programación, se tiene lo siguiente:

✓ Trabajo

Los trabajos son actividades para realizar. Se supone que cada trabajo tiene un tiempo de procesamiento conocido. A menos que se establezca de otra manera, una vez que comienza a realizarse un trabajo, debe procesarse continuamente hasta terminarlo; es decir, no se permiten interrupciones.

✓ Máquinas

Las máquinas procesan trabajos. En la manufactura, una máquina puede ser una máquina de moldeo automático. Los entornos de las máquinas se dividen en varias clases: una sola máquina, máquinas paralelas, talleres de producción continua, producción intermitente y plantas abiertas.

Para los problemas en una sola máquina, se tiene sólo una máquina y deben procesarse en ella todos los trabajos.

Varias máquinas que pueden realizar el mismo tipo de procesamiento se llaman máquinas paralelas.

Un taller de producción continua contiene máquinas diferentes.

Un taller de producción intermitente es más general que el de producción continua: cada trabajo tiene una ruta única.

Los talleres abiertos son aquellos en los que los trabajos no tienen una ruta específica.

✓ Medición

Una medida normal es una función del tiempo de terminación, en la que el objetivo es minimizar la función y donde esa función sólo se incrementa si al menos un tiempo de terminación en el programa aumenta. Sean

n = número de trabajos que serán procesados

m = número de máquinas $p * k$ = tiempo de procesamiento del trabajo i en la máquina k ($p_{i \text{ sim}} = 1$)

r_i = tiempo de liberación de la orden (o fecha de distribución) del trabajo i d_i =

fecha de entrega del trabajo i w_i = ponderación (importancia o valor) del trabajo i respecto a los otros trabajos.

Dado un programa específico, se define para cada trabajo i

C_i - tiempo de terminación del trabajo i

$F_i = C_i - r_i$, tiempo de flujo del trabajo i ($F_i > 0$)

$L_i = C_i - d_i$, retraso del trabajo i ($L_i < 0$ denota anticipación)

$T_i = \max \{0, L_i\}$, tardanza del trabajo i

$E_i = \max \{0, L_i\}$, adelanto del trabajo i

$\delta_i = 1$ si el trabajo i se atrasa (es decir si $T_i > 0$)

$\delta_i = 0$ si el trabajo i está a tiempo o se adelanta (es decir $T_i = 0$)

$C_{\max} = \max_{i=1,n} \{C_i\}$, tiempo máximo de terminación de todos los trabajos o lapso

$L_{\max} = \max_{i=1,n} \{L_i\}$, retraso máximo de todos los trabajos

$T_{m\acute{a}x} = \max_{i=l,n} \{T_i\}$, tardanza máxima de todos los trabajos

Los objetivos sustitutos comunes incluyen minimizar el tiempo de flujo total, la tardanza total, el tiempo máximo de terminación, la tardanza máxima o el número de trabajos retrasados.

✓ Gráficas de Gantt

El propósito de la gráfica es desplegar el estado de cada recurso (casi siempre una máquina) en todo momento. El eje x representa el tiempo y el eje y consiste en una barra horizontal para cada máquina. Cuando tiene que procesarse un trabajo en una máquina, se coloca un rectángulo en la barra horizontal, que comienza en el tiempo de inicio del trabajo y concluye en su tiempo de terminación. Las gráficas de Gantt también se pueden construir colocando trabajos en lugar de máquinas en el eje y (Sippen & Bulfin, 1998).

3.2 Revisión de la literatura

En artículos consultados se hallan diversos problemas de programación o scheduling aplicados a diferentes tipos de industrias, de los cuales en su mayoría se enfocan en procesos tipo batch o discretos. En (Guimarães, Klabjan, & Almada-Lobo, 2012) por ejemplo, realizan un estudio de scheduling en una planta de bebidas azucaradas y embotelladora de agua, en el cual se asignan lotes de producción en un ambiente multi-planta.

Otra industria objetivo de este tipo de estudios es la de jugos de fruta (Pagliarussi, Morabito, & Santos, 2016), en la cual consideran las restricciones de tiempos de limpieza de líneas y tanques empleando métodos heurísticos modificados de “mixed integer programming” o MIP.

En (Sáenz-Alanís, Jobish, Salazar-Aguilar, & Boyer, 2016) por ejemplo, trata de una propuesta de programación empleando metaheurística denominada “patrones generales de software para asignación de responsabilidades” o GRASP por su siglas en inglés, en el cual, se enfocan en la planeación de cocimientos, el manejo de la levadura y la distribución de los tanques de fermentación a emplear, sin embargo, la planta en la que se desarrolla la propuesta consta de cocimiento de mosto tipo batch.

Otros autores como (Baldo, Santos, Almada-Lobo, & Morabito, 2014), emplearon heurística MIP aplicado también en la industria cervecera enfocado en los problemas de sincronización entre los tanques de cerveza filtrada y las líneas de envase, considerando el cuello de botella causado por los largos tiempos de fermentación y maduración en el área de cavas. Sin embargo, este estudio asume que la cerveza brillante, es decir, la que está lista para ser envasada puede almacenarse durante varios días; sin embargo, en el presente caso de estudio dicha cerveza solo puede permanecer hasta un máximo de 48 horas debido a políticas internas de la compañía.

Posteriormente, otro equipo de investigación trabajó un caso de estudio en la misma industria cervecera empleando MIP con otros algoritmos como “el vendedor viajero asimétrico” o ATSP por sus siglas en inglés (Baldo, Morabito, Santos, & Guimarães, 2017), la cual dividen el problema en dos casos A y B. El caso A es la configuración

explícita de cambio de tanques y el caso B en el cual no se tiene en cuenta dicha configuración debido a la tecnología y automatización involucrada en el proceso.

En (Georgiadis, Elekidis, & Georgiadis, 2021) los autores proponen un modelo matemático basado en (Baldo et al., 2014) de MILP para generar una programación de producción del proceso desde las cavas, suponen un suministro infinito de mosto del proceso anterior y planean los procesos posteriores. Se simularon en el modelo GEG creado por los autores, un total de 28 combinaciones de características aleatorias pero típicas de la planta en donde se desarrolló el estudio variando los volúmenes de demanda de sus líquidos, días de fermentación y el flujo de las líneas de envasado. Finalmente se compararon los resultados con el algoritmo propuesto por (Baldo et al., 2014) generando mejores resultados pero con la salvedad de que el caso de estudio involucró menos variables binarias.

En otros artículos consultados que se desarrollan en torno a planeaciones de producción considerando las posibles fallas de equipos y alistamiento de máquinas, se encuentran (Cui, 2020) en la cual formula un algoritmo de tres etapas para reducir la incertidumbre de los efectos de falla de solo una máquina.

Otras investigaciones como (Wu et al., 2020) y (Toscano, Ferreira, & Morabito, 2019), formulan planes de producción y mantenimiento en plantas de producción multiproducto con restricciones claves como el tiempo de vencimiento del producto manufacturado, la preparación de máquinas y limpiezas mandatorias de las mismas. Finalmente (Xu, Dong, Jin, & Wang, 2020), presenta un modelo de producción de solo una máquina bajo el esquema de mantenimiento fijo y flexible, logrando reducción del makespan y el tiempo total de flujo.

4. PROPUESTA METODOLÓGICA

4.1 Caracterización del proceso

La Figura 6 representa el esquema general del proceso que se va a modelar. Inicia de izquierda a derecha mostrando primero la línea de trasiego hacia los tanques de maduración, etapa en la cual la cerveza adquiere sus características organolépticas más representativas y toma de dos a cuatro días o más dependiendo de la marca (Distilling, 2014).

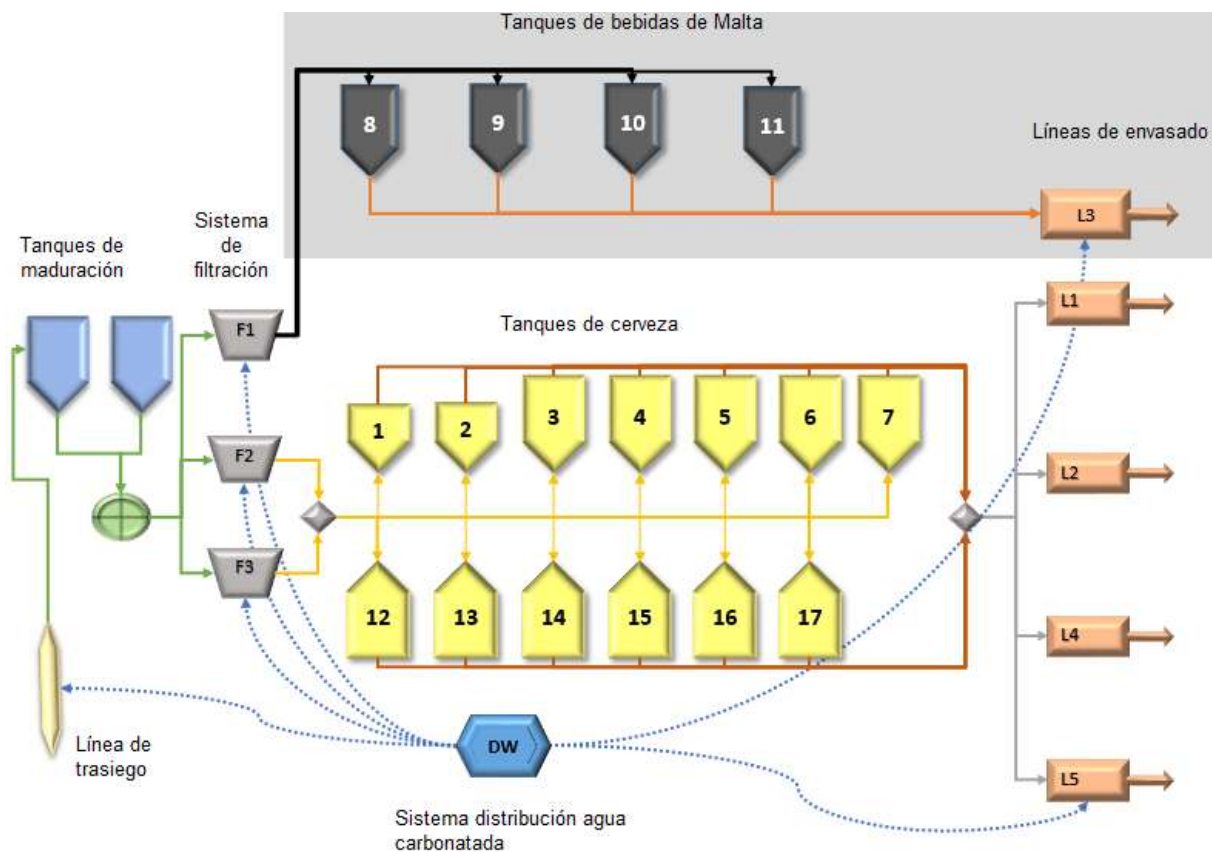


Figura 7 Diagrama general del proceso a modelar. Autor.

Con el fin de simplificar un poco el diagrama anterior, se ha propuesto la Figura 7 para identificar las características de cada una de las etapas presentes en dicho proceso.

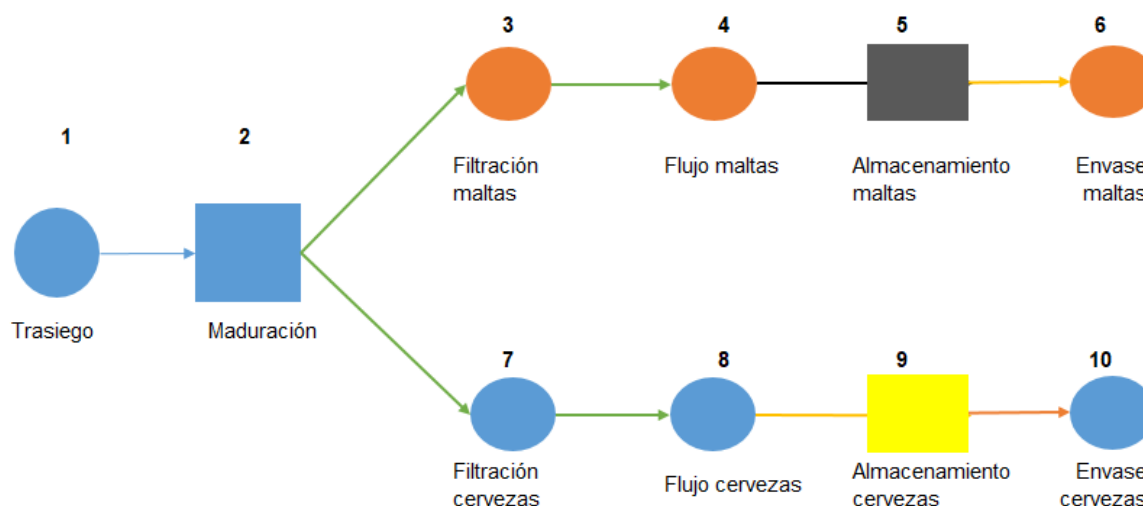


Figura 8 Diagrama simplificado del proceso a modelar. Autor.

Los procesos 1 y 2 son comunes entre ambas categorías (cervezas y maltas) y consta de un procesamiento trasiego y uno de almacenamiento maduración.

Los procesos 3, 4, 5 y 6 son exclusivos de la categoría maltas y consta de tres procesamientos de una sola máquina cada uno y un almacenamiento que lo constituyen cuatro tanques o máquinas en términos de descripción del modelo.

La máquina de los procesos 3 y 4 es un filtro con una capacidad de filtración de 450 hL/h, los cuatro tanques de almacenamiento del proceso 5 tienen capacidad de 2250 hL cada uno y la máquina del proceso 6 varía su flujo de envasado según el formato del producto tal como se presenta en la Tabla 1.

Formato	Flujo envasado hL/h
F1	100
F2	255
F3	290
F4	310

Tabla 1 Flujo envase de maltas según formato. Autor.

Los procesos 7, 8, 9 y 10 son exclusivos de la categoría cervezas y consta de dos máquinas en los procesamientos 7 y 8, trece tanques de almacenamiento o máquinas en el proceso 9 y finalmente cuenta con cuatro máquinas en el procesamiento 10.

La máquina 1 de los procesos 7 y 8 es un filtro con capacidad de 750 hL/h, mientras que la máquina 2 de los mismos procesos posee capacidad de 600 hL/h. De los trece tanques de almacenamiento de cervezas hay dos con capacidad de 430 hL, el resto cuenta con capacidad de 2250 hL. El proceso 10 posee cuatro máquinas de envase cada uno con capacidades diferentes tal como se presenta en la Tabla 2.

Máquina	Flujo envasado hL/h
M1	396
M2	198
M3	284
M4	264

Tabla 2 Flujo de envase cervezas según máquina. Autor.

4.2 Definición del modelo matemático

4.2.1 Descripción del modelo

El modelo matemático propuesto considera un horizonte de planeación de una semana determinada en 168 horas. En los procesos 1 y 2 al ser comunes entre ambas categorías, pero contienen máquinas independientes que contienen cada producto de forma separada, por lo tanto, en esta etapa no se modelan necesidades de volumen de producto y se toma el supuesto de disponibilidad infinita de producto para los procesos siguientes de filtración o procesos 3 y 7.

Se declaran inicialmente los conjuntos involucrados en el modelo, categorías, productos, lotes, tipos de proceso, procesos, máquinas, procesos anteriores, siguientes y un conjunto ficticio de agua.

Los parámetros a tener en cuenta son las capacidades nominales de las máquinas, capacidades de almacenamiento de tanques, la matriz de alistamiento de productos el cual define qué producto puede ir contiguo al siguiente y sus respectivos tiempos de alistamiento entre máquinas antes de iniciar operaciones.

Se definen una serie de variables enteras y binarias responsables en su mayoría de la secuenciación de los procesos para evitar los traslapes y procesamientos de dos productos diferentes al mismo tiempo en la misma máquina.

Las restricciones que se han definido permiten que el plan no exceda el horizonte de planeación, evitan la entrada de una determinada categoría de productos a un proceso equivocado y aseguran secuenciación con el fin de evitar que un lote n de producto i entre nuevamente a un proceso anterior que no le corresponde.

4.2.2 Conjuntos

- C : Conjunto de categorías (Maltas y cervezas), indexadas por el subíndice c .
- I_c : Conjunto de productos indexados por el subíndice i , de la categoría c .
- N_i : Conjunto de lotes indexados por el subíndice n , del producto i .
- K : Conjunto de tipos de procesos (transporte y almacenamiento), indexados por el subíndice k .
- P_{ck} : Conjunto de procesos indexados por el subíndice p , del tipo de proceso k de la categoría c .
- M_p : Conjunto de máquinas indexadas por el subíndice m , del proceso p .
- $P2_p$: Conjunto de procesos siguientes del proceso p .
- $P3_p$: Conjunto de procesos anteriores del proceso p .
- Agua: Conjunto de productos ficticios para los procesos que requieren agua carbonatada

4.2.3 Parámetros

- GAP : Brecha de capacidad de los tanques de almacenamiento definida en 0.1
- F_i : Demanda de i (hL de producto).
- V_{1pm} : Flujo de las máquinas de filtración y de envasado (hL/h).
- V_{2im} : Flujo de las máquinas de envasado por tipo de formato (hL/h).
- T : Horizonte de tiempo para la cual se va a definir el programa (semana 168h).
- d_{ij} : Matriz de alistamiento entre productos.
- CAP_{pm} : Capacidad de los tanques de almacenamiento (hL).
- ta_{pck} : Tiempo de alistamiento del proceso p , de la categoría c , del tipo de proceso k (tiempo en horas).

4.2.4 Variables

- ✓ Se asegura que el porcentaje del lote n del producto i sea un valor positivo.

$$R_{in} \geq 0, \forall i \in (I_{[c]} \cup \{c \in C\}), \forall n \in N_{[i]} \quad (\text{Ec. 1})$$

- ✓ Variable binaria de activación del lote n del producto i : $\begin{cases} 1 & \text{si se activa} \\ 0 & \text{lo contrario} \end{cases}$

$$Y_{in} = \text{binary}, \forall i \in (I_{[c]} \cup \{c \in C\}), \forall n \in N_{[i]} \quad (\text{Ec. 2})$$

- ✓ Variable binaria de conectividad de los lotes n del producto i y el lote o del producto j , en la máquina m del proceso p : $\begin{cases} 1 & \text{si se conectan} \\ 0 & \text{lo contrario} \end{cases}$

$$X_{pminjo} = \text{binary}, \quad (\text{Ec. 3})$$

$$\forall p \in (P_{[c,k]} \cup \{c \in C, k \in K\}), \forall m \in M_{[p]}, \forall i \in (I_{[c]} \cup \{c \in C\} \cup \{0\}),$$

$$\forall n \in N_{[i]}, \forall j \in (I_{[c]} \cup \{c \in C\} \cup \{0\}), \forall o \in N_{[j]}$$

- ✓ Variable binaria de activación del lote n del producto i que pasa por la máquina m de un proceso p : $\begin{cases} 1 & \text{si se activa} \\ 0 & \text{lo contrario} \end{cases}$

$$Z_{pmin} = \text{binary} \quad (\text{Ec. 4})$$

$$\forall_p \in (P_{[c,k]} \cup \{c \in C, k \in K\}), \forall_m \in M_{[p]}, \forall_i \in (I_{[c]} \cup \{c \in C\}), \forall_n \in N_{[i]}$$

- ✓ La variable de tiempo de inicio del lote n del producto i en la máquina m del proceso p de la categoría c debe ser un valor positivo.

$$s_{cpmin} \geq 0 \quad (\text{Ec. 5})$$

$$\forall_c \in C, \forall_p \in (P_{[c,k]} \cup \{k \in K\}), \forall_m \in M_{[p]}, \forall_i \in I_{[c]}, \forall_n \in N_{[i]}$$

- ✓ La variable de tiempo de finalización del lote n del producto i en la máquina m del proceso p de la categoría c debe ser un valor positivo.

$$e_{cpmin} \geq 0 \quad (\text{Ec. 6})$$

$$\forall_c \in C, \forall_p \in (P_{[c,k]} \cup \{k \in K\}), \forall_m \in M_{[p]}, \forall_i \in I_{[c]}, \forall_n \in N_{[i]}$$

4.2.5 Restricciones

- ✓ Un lote n del producto i debe activarse a la vez en la máquina m del proceso p .

$$(\text{Ec. 7})$$

$$\sum_{m \in M_{[p]}} Z_{pmin} \geq Y_{in} \quad \forall_p \in (P_{[c,k]} \cup \{c \in C, k \in K\}), \forall_i \in I_{[c]} \cup \{c \in C\}, \forall_n \in N_{[i]}$$

- ✓ La secuencia del proceso debe seguirse de acuerdo a la figura 1. Se envasa un producto i después de almacenarse, se almacena después de filtrarse y se filtra después de trasegarse.

(Ec. 8)

$$\sum_{m \in M_{[p]}} Z_{pmin} \leq Y_{in} * last(M_{[p]})$$

$$\forall_p \in (P_{[c,k]} \cup \{c \in C, k \in K\}), \forall_i \in I_{[c]} \cup \{c \in C\}, \forall_n \in N_{[i]}$$

- ✓ La fracción del lote n del producto i que se consume es 1-GAP, es decir 0.9.

(Ec. 9)

$$\sum_{n \in N_{[i]}} R_{in} \geq 1 - GAP \quad \forall_i \in I_{[c]} \cup \{c \in C\}$$

- ✓ La fracción de cada lote del producto i debe ser menor a 1.

(Ec. 10)

$$\sum_{n \in N_{[i]}} R_{in} \leq 1 \quad \forall_i \in I_{[c]} \cup \{c \in C\}$$

- ✓ Se debe asegurar que la fracción de un solo lote n del producto i debe ser menor al binario de activación del lote n del producto i .

$$R_{in} \leq Y_{in} \quad \forall_i \in (I_{[c]} \cup \{c \in C\}), \forall_n \in N_{[i]} \quad (\text{Ec. 11})$$

- ✓ La fracción del lote n del producto i debe ser mayor al cociente entre el binario de activación y el conjunto de lotes.

(Ec. 12)

$$R_{in} \geq \frac{Y_{in}}{\text{card}(N_{[i]}) + 1} \quad \forall_i \in (I_{[c]} \cup \{c \in C\}), \forall_n \in N_{[i]}$$

✓ Activación de un solo lote n del producto i a la vez.

$$Y_{in} \geq Y_{i\ n+1} \quad \forall_i \in (I_{[c]} \cup \{c \in C\}), \forall_n \in N_{[i]} : n < \text{card}(N_{[i]}) \quad (\text{Ec. 13})$$

✓ Las restricciones 14 y 15 evitan el procesamiento de dos productos a la vez en la misma máquina, asegurando que los tiempos de finalización sean posteriores con respecto a los tiempos de iniciación de cada proceso. Se tiene en cuenta la demanda del producto, los flujos de procesamiento y la capacidad de los tanques de almacenamiento.

$$e_{cpmin} \geq s_{cpmin} + R_{in} * \left(\frac{F_i}{V_{1pm}} \right) - T * (1 - Z_{pmin}) \quad (\text{Ec. 14})$$

$$\forall_c \in C, \forall_p \in P_{[c,1]}, \forall_m \in M_{[p]}, \forall_i \in I_{[c]}, \forall_n \in N_{[i]} : p \neq \text{last}(P_{[maltas,1]})$$

$$e_{cpmin} \geq s_{cpmin} + \left(\frac{CAP_{[p,m]}}{V_{1[p,m]}} \right) * Z_{pmin} - T * (1 - Z_{pmin}) \quad (\text{Ec. 15})$$

$$\forall_c \in C, \forall_p \in P_{[c,2]}, \forall_m \in M_{[p]}, \forall_i \in I_{[c]}, \forall_n \in N_{[i]}, \forall_{px} \in P_{3[p]}, \forall_{mx} \in M_{[px]}$$

✓ Las restricciones 16 y 17 permiten que cuando la variable binaria Z sea cero, haga cero también e y s, así se evitan valores negativos de tiempos en los resultados.

$$e_{cpmin} \leq T * Z_{pmin} \quad (\text{Ec. 16})$$

$$\forall_c \in C, \forall_p \in (P_{[c,k]} \cup \{k \in K\}), \forall_m \in M_{[p]}, \forall_i \in I_{[c]}, \forall_n \in N_{[i]}$$

$$s_{cpmin} \leq T * Z_{pmin} \quad (\text{Ec. 17})$$

$$\forall_c \in C, \forall_p \in (P_{[c,k]} \cup \{k \in K\}), \forall_m \in M_{[p]}, \forall_i \in I_{[c]}, \forall_n \in N_{[i]}$$

- ✓ Las restricciones 18 y 19 aseguran que el último tiempo de finalización debe ser mayor o igual al último tiempo de finalización del proceso anterior.

$$e_{maltas,last(P[maltas,1]),m,i,n} \geq s_{maltas,last(P[maltas,1]),m,i,n} + R_{in} * \left(\frac{F_i}{V2_{im}} \right) - T * (1 - Z_{last(P[maltas,1]),m,i,n})$$

$$\forall_m \in M_{[last(P[maltas,1])], \forall_i \in I_{[maltas]}, \forall_n \in N_{[i]}} \quad (\text{Ec. 18})$$

$$e_{maltas,last(P[maltas,1]),m,i,n} \leq s_{maltas,last(P[maltas,1]),m,i,n} + R_{in} * \left(\frac{F_i}{V2_{im}} \right) + T * (1 - Z_{last(P[maltas,1]),m,i,n})$$

$$\forall_m \in M_{[last(P[maltas,1])], \forall_i \in I_{[maltas]}, \forall_n \in N_{[i]}} \quad (\text{Ec. 19})$$

- ✓ Las restricciones 20 y 21 aseguran tiempos de inicio de proceso respecto al tiempo de finalización del proceso anterior teniendo en cuenta el tiempo de alistamiento entre productos.

$$s_{cpmjo} \geq e_{cpmin} + d_{ij} * ta_p * X_{pminjo} - T * (1 - X_{pminjo})$$

$$\forall_c \in C, \forall_p \in (P_{[c,k]} \cup \{k \in K\}), \forall_m \in M_{[p]}, \forall_i \in I_{[c]}, \forall_n \in N_{[i]}, \forall_j \in I_{[c]}, \forall_o \in N_{[j]}} \quad (\text{Ec. 20})$$

$$s_{cpmjo} \leq e_{cpmin} + d_{ij} * ta_p * X_{pminjo} + T * (1 - X_{pminjo})$$

$$\forall_c \in C, \forall_p \in (P_{[c,k]} \cup \{k \in K\}), \forall_m \in M_{[p]}, \forall_i \in I_{[c]}, \forall_n \in N_{[i]}, \forall_j \in I_{[c]}, \forall_o \in N_{[j]}} \quad (\text{Ec. 21})$$

- ✓ Las restricciones 22 y 23 aseguran que los productos pertenecientes a la categoría 'maltas' deban finalizar en el proceso 6 y no entrar al proceso 7.

$$s_{maltas,r,l,i,n} \geq e_{maltas,p,m,i,n} - T * (2 - Z_{pmin} - Z_{rlin}) \quad (\text{Ec. 22})$$

$$\forall_p \in (P_{[maltas,k]} \cup \{k \in K\}), \forall_m \in M_{[p]}, \forall_i \in I_{[maltas]}, \forall_n \in N_{[i]},$$

$$\forall_r \in P2_{[p]}, \forall_l \in M_{[r]}: r \neq 7: p \neq \{6,7\}$$

$$s_{maltas,r,l,i,n} \leq e_{maltas,p,m,i,n} + T * (2 - Z_{pmin} - Z_{rlin}) \quad (\text{Ec. 23})$$

$$\forall_p \in (P_{[maltas,k]} \cup \{k \in K\}), \forall_m \in M_{[p]}, \forall_i \in I_{[maltas]}, \forall_n \in N_{[i]},$$

$$\forall_r \in P2_{[p]}, \forall_l \in M_{[r]}: r \neq 7: p \neq \{6,7\}$$

- ✓ Las restricciones 24 y 25 aseguran que los productos pertenecientes a la categoría 'cervezas' deban finalizar en el proceso 10 y no entrar al proceso 3.

$$s_{cervezas,r,l,i,n} \geq e_{cervezas,p,m,i,n} - T * (2 - Z_{pmin} - Z_{rlin}) \quad (\text{Ec. 24})$$

$$\forall_p \in (P_{[cervezas,k]} \cup \{k \in K\}), \forall_m \in M_{[p]}, \forall_i \in I_{[cervezas]}, \forall_n \in N_{[i]},$$

$$\forall_r \in P2_{[p]}, \forall_l \in M_{[r]}: r \neq 3: p \neq \{3,10\}$$

$$s_{cervezas,r,l,i,n} \leq e_{cervezas,p,m,i,n} + T * (2 - Z_{pmin} - Z_{rlin}) \quad (\text{Ec. 25})$$

$$\forall_p \in (P_{[cervezas,k]} \cup \{k \in K\}), \forall_m \in M_{[p]}, \forall_i \in I_{[cervezas]}, \forall_n \in N_{[i]},$$

$$\forall_r \in P2_{[p]}, \forall_l \in M_{[r]}: r \neq 3: p \neq \{3,10\}$$

- ✓ La demanda de los productos i deben ser menores o iguales a la capacidad total de los tanques de almacenamiento que se activen según la variable Z .

$$R_{in} * F_i \leq \sum_{m \in M_{[p]}} CAP_{pm} * Z_{pmin}$$

$$\forall_c \in C, \forall_p \in P_{[c,2]}, \forall_i \in I_{[c]}, \forall_n \in N_{[i]} \quad (\text{Ec. 26})$$

- ✓ Las restricciones 27 y 28 aseguran que los tiempos de inicio y finalización de los procesos posteriores sean mayores a la de los procesos anteriores, para evitar que hayan traslapes.

$$s_{c,p,m1,i,n1} \geq s_{c,p,m2,i,n2} - T * (2 - Z_{p,m2,i,n2} - Z_{p,m1,i,n1}) \quad (\text{Ec. 27})$$

$$\forall_c \in C, \forall_p \in P_{[c,2]}, \forall_{m1} \in M_{[p]}, \forall_{m2} \in M_{[p]}, \forall_i \in I_{[c]}, \forall_{n1} \in N_{[i]}, \forall_{n2} \in N_{[i]}:$$

$$m1 \neq m2 \text{ and } n1 \neq n2$$

$$e_{c,p,m1,i,n1} \geq e_{c,p,m2,i,n2} - T * (2 - Z_{p,m2,i,n2} - Z_{p,m1,i,n1}) \quad (\text{Ec. 28})$$

$$\forall_c \in C, \forall_p \in P_{[c,2]}, \forall_{m1} \in M_{[p]}, \forall_{m2} \in M_{[p]}, \forall_i \in I_{[c]}, \forall_{n1} \in N_{[i]}, \forall_{n2} \in N_{[i]}:$$

$$m1 \neq m2 \text{ and } n1 \neq n2$$

- ✓ Se asegura el trasiego de un producto i a la vez por la línea de ese proceso.

$$\sum_{i \in I_{[c]}} \sum_{n \in N_{[i]}} X_{p,m,0,1,i,n} \leq 1$$

$$\forall_c \in C, \forall_p \in (P_{[c,k]} \cup \{k \in K\}), \forall_m \in M_{[p]} \quad (\text{Ec. 29})$$

✓ Envasado del producto i una vez haya finalizado el trasiego.

$$\sum_{i \in I_{[c]}} \sum_{n \in N_{[i]}} X_{p,m,i,n,0,1} \leq 1$$

$$\forall_c \in C, \forall_p \in (P_{[c,k]} \cup \{k \in K\}), \forall_m \in M_{[p]} \quad (\text{Ec. 30})$$

✓ Las restricciones 31 y 32 aseguran la secuenciación de lotes de productos a través de las máquinas m de los procesos p.

$$\sum_{i \in I_{[c]} \cup \{0\}} \sum_{n \in N_{[i]} : (i,n) \neq (h,r)} X_{p,m,i,n,h,r} = \sum_{j \in I_{[c]} \cup \{0\}} \sum_{o \in N_{[j]} : (j,o) \neq (h,r)} X_{p,m,h,r,j,o}$$

$$\forall_c \in C, \forall_p \in (P_{[c,k]} \cup \{k \in K\}), \forall_m \in M_{[p]}, \forall_h \in I_{[c]}, \forall_r \in N_{[h]} \quad (\text{Ec. 31})$$

$$\sum_{i \in I_{[c]} \cup \{0\}} \sum_{n \in N_{[i]}} \sum_{m \in M_{[p]} : (i,n) \neq (h,r)} X_{p,m,i,n,h,r} = Y_{hr}$$

$$\forall_c \in C, \forall_p \in (P_{[c,k]} \cup \{k \in K\}), \forall_h \in I_{[c]}, \forall_r \in N_{[h]} \quad (\text{Ec. 32})$$

✓ Los lotes o, de los productos siguientes j deben procesarse uno a la vez.

$$X_{[pminjo]} + X_{[pmjoin]} \leq 1 \quad (\text{Ec. 33})$$

$$\forall_p \in (P_{[c,k]} \cup \{c \in C, k \in K\}), \forall_m \in M_{[p]}, \forall_i \in (I_{[c]} \cup \{c \in C\} \cup \{0\}),$$

$$\forall_n \in N_{[i]}, \forall_j \in (I_{[c]} \cup \{c \in C\} \cup \{0\}), \forall_o \in N_{[j]}$$

- ✓ Las restricciones 34 al 36 aíslan dos horas en el horizonte de tiempo de tal forma que los procesos de trasiego, filtración y envase no estén en funcionamiento para la que el proceso de limpieza en el distribuidor pueda ejecutarse.

$$e_{c,i,j,k,l} = e_{c1,i1,j1,k1,l1} \quad \forall_{c,i,j,k,l} \in Agua, \forall_{c1,i1,j1,k1,l1} \in Agua \quad (\text{Ec. 34})$$

$$s_{c,i,j,k,l} = s_{c1,i1,j1,k1,l1} \quad \forall_{c,i,j,k,l} \in Agua, \forall_{c1,i1,j1,k1,l1} \in Agua \quad (\text{Ec. 35})$$

$$e_{c,i,j,k,l} = s_{c,i,j,k,l} + 2 \quad \forall_{c,i,j,k,l} \in Agua \quad (\text{Ec. 36})$$

4.3 Caso de estudio

4.3.1 Conjunto de categorías

La empresa en donde se desarrolla el modelo cuenta con dos tipos de categorías definidas como “malts” y “cervezas”.

4.3.2 Conjunto de productos

Se cuenta con diversas marcas en cada una de las categorías y se clasifican en:

$I_{[malts]}$: M13 M14 M15 M16 M17 M19 M20;

$I_{[cervezas]}$: M1 M2 M3 M4 M5 M6 M9 M10 M11 M18 M21 M22 M23 M24;

Adicionalmente se crea un conjunto denominado “Agua” con productos ficticios para determinar en la programación los momentos en los que se requiere agua a los procesos en los que se requiere y así mismo definir la brecha de tiempo donde es posible ejecutar el plan de limpiezas del sistema de distribución de agua carbonatada.

Agua: (maltas, 6,1, M17,1), (cervezas, 10,4, M18,1), (maltas, 3,1, M19,1),
(maltas, 4,1, M20,1), (cervezas, 7,1, M21,1), (cervezas, 7,2, M22,1),
(cervezas, 8,1, M23,1), (cervezas, 8,2, M24,1);

4.3.3 Conjunto de lotes

A cada producto se le permite la partición en tres lotes y se representa de manera general así:

$N_{[Mx]}$: 1, 2, 3;

4.3.4 Conjunto de tipos de proceso

Como se observa en la Figura 7, el proceso cuenta con dos tipos de procesos: de almacenamiento y de procesamiento.

$K: \begin{cases} 1 \text{ Almacenamiento} \\ 2 \text{ Procesamiento} \end{cases}$

$P_{[maltas,2]} = 5;$	Almacenamiento en maltas
$P_{[maltas,1]} = 1, 3, 4, 6;$	Procesamiento en maltas
$P_{[cervezas,2]} = 9;$	Almacenamiento en cervezas
$P_{[cervezas,1]} = 1, 7, 8, 10;$	Procesamiento en cervezas

4.3.5 Conjunto de máquinas

Cada etapa de proceso cuenta con ciertas máquinas y se clasifican así $M_{[p]}$:

$M_{[1]}$: 1;	Máquina del trasiego
$M_{[3]}$: 1;	Máquina filtración maltas
$M_{[4]}$: 1;	Máquina filtración maltas
$M_{[5]}$: 1, 2, 3, 4;	Tanques de almacenamiento maltas
$M_{[6]}$: 1;	Máquina de envasado maltas

$M_{[7]}$: 1, 2;	Máquina 1 filtración cervezas
$M_{[8]}$: 1, 2;	Máquina 2 filtración cervezas
$M_{[9]}$: 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13;	Tanques de almacenamiento cervezas
$M_{[10]}$: 1, 2, 3, 4;	Máquinas de envasado cervezas

4.3.6 Conjunto de procesos siguientes y procesos anteriores

Con el fin de evitar que el modelo altere la secuenciación de los procesos, se estableció este par de conjuntos que permiten direccionar correctamente los líquidos durante todo el proceso.

Procesos siguientes $P2_{[p]}$

$P2_{[1]}$: 3, 7;

$P2_{[3]}$: 4;

$P2_{[4]}$: 5;

$P2_{[5]}$: 6;

$P2_{[7]}$: 8;

$P2_{[8]}$: 9;

$P2_{[9]}$: 10;

Procesos anteriores $P3_{[p]}$

$P3_{[3]}$: 1;

$P3_{[4]}$: 3;

$P3_{[5]}$: 4;

$P3_{[6]}$: 5;

$P3_{[7]}$: 1;

$P3_{[8]}$: 7;

$P3_{[9]}$: 8;

$P3_{[10]}$: 9;

4.3.7 Parámetros de flujo de las líneas de envasado

Este conjunto especifica el flujo en hL/h de envasado de cada línea y por cada formato, los valores de flujo son relevantes en la modelación debido a que así se determinan los tiempos de envasado.

$V1_{[p,m]}$: (en hL/h)	Proceso
[1,1] 600	Trasiego
[3,1] 250	Entrada filtro 1
[4,1] 450	Salida filtro 1
[7,1] 500	Entrada filtro 2
[7,2] 380	Salida filtro 2
[8,1] 750	Entrada filtro 3
[8,2] 600	Salida filtro 3
[10,1] 396	Flujo máquina de maltas formato 1
[10,2] 198	Flujo máquina de maltas formato 2
[10,3] 284	Flujo máquina de maltas formato 3
[10,4] 264	Flujo máquina de maltas formato 4

4.3.8 Parámetros de demanda

La demanda de F_i viene dada de acuerdo a una semana típica de producción y a continuación se presentan los datos a modelar en hL/semana.

[M1] 17400	[M10] 4250
[M2] 13800	[M11] 18000
[M3] 9000	[M13] 2380
[M4] 4800	[M14] 4300
[M5] 7000	[M15] 1100
[M6] 4400	[M16] 3800
[M9] 2250	

4.3.9 Parámetros de capacidad de tanques

La planta cuenta con un total de 17 tanques de almacenamiento de los cuales 4 de ellos son exclusivamente para la categoría maltas y el resto son para la categoría cervezas; dos tanques de cervezas poseen una capacidad menor a los demás.

Tanques de maltas

[5,1] 2250

[5,3] 2250

[5,2] 2250

[5,4] 2250

Tanques de cervezas

[9,1] 430

[9,8] 2250

[9,2] 430

[9,9] 2250

[9,3] 2250

[9,10] 2250

[9,4] 2250

[9,11] 2250

[9,5] 2250

[9,12] 2250

[9,6] 2250

[9,13] 2250

[9,7] 2250

5. RESULTADOS Y ANÁLISIS

El modelo se ejecutó con el solver Gurobi incluido en el software AMPL (Algebraic Mathematical Programming Language) en un computador con procesador Intel Core I3 de 2.0 GHz y una memoria RAM de 8GB. La ejecución del modelo presentó 1654 variables continuas y 25910 variables enteras binarias.

5.1 Variable de decisión Y_{in}

Los resultados de la variable de decisión Y_{in} , presenta una lista de los lotes que se activaron de cada producto.

La tabla 3 demuestra que para cada producto se activó al menos un lote para cumplir con la demanda solicitada.

Y	[*,*]		
:	1	2	3
M1	1	0	0
M10	1	0	0
M11	1	1	1
M13	1	0	0
M14	1	0	0
M15	1	0	0
M16	1	0	0
M2	1	0	0
M3	1	0	0
M4	1	0	0
M5	1	0	0
M6	1	0	0
M9	1	0	0

Tabla 3 Resultados variable Y_{in} . Autor

5.2 Variable de decisión X_{pminjo}

La variable de decisión X_{pminjo} , genera una larga lista de los productos que se activaron en el proceso y máquina definidos por los subíndices de X.

La tabla 4 por ejemplo, establece que para el proceso 5 de almacenamiento perteneciente a la categoría maltas, se deben emplear los tanques 4 y 2 para almacenar las marcas M13 y M14 respectivamente.

X	[5,*,0,1,*,1]	(tr)		
:	1	2	3	4
0	0	0	0	0
M1	0	0	0	0
M10	0	0	0	0
M11	0	0	0	0
M13	0	0	0	1
M14	0	1	0	0
M15	0	0	0	0
M16	0	0	0	0
M2	0	0	0	0
M3	0	0	0	0
M4	0	0	0	0
M5	0	0	0	0
M6	0	0	0	0
M9	0	0	0	0

Tabla 4 Resultados de la variable X_{pminjo} . Autor

5.3 Variable de decisión Z_{pmin}

El rol de la variable de decisión Z_{pmin} , es activar lotes n , de cada producto i , en la máquina m del proceso p .

La tabla 5 presenta los lotes que se activaron de cada producto i en la máquina 1 proceso 1 perteneciente a trasiego. Todos se activaron debido con el fin de cumplir con la demanda requerida.

Z	[1,*,*,1]												
:	M1	M10	M11	M13	M14	M15	M16	M2	M3	M4	M5	M6	M9
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Tabla 5 Resultados variable Z_{pmin} . Autor

5.4 Variables de decisión s y e

Los resultados del modelo respecto a estas variables arrojan una lista de valores que deben ser organizadas para obtener los tiempos de iniciación y finalización de cualquiera de los procesos de interés. En la Tabla 6 se presentan los resultados filtrados para la marca M6 de la categoría cervezas.

Categoría	Proceso	Máquina	Marca	Lote	e	s
cervezas	1	1	M6	1	89.0	82.4
cervezas	7	1	M6	1	96.9	89.0
cervezas	8	1	M6	1	103.5	96.9
cervezas	9	3	M6	1	158.0	103.5
cervezas	10	1	M6	1	168.0	158.0

Tabla 6 Resultados variables s y e para marca M6. Autor

La tabla 6 genera un gráfico como el de la Figura 9 donde se puede observar los tiempos de M6 en cada una de las máquinas de cada proceso. Puede apreciarse que cada uno de los procesos son escalonados uno tras otro sin ningún tipo de traslapes o reprocesos.

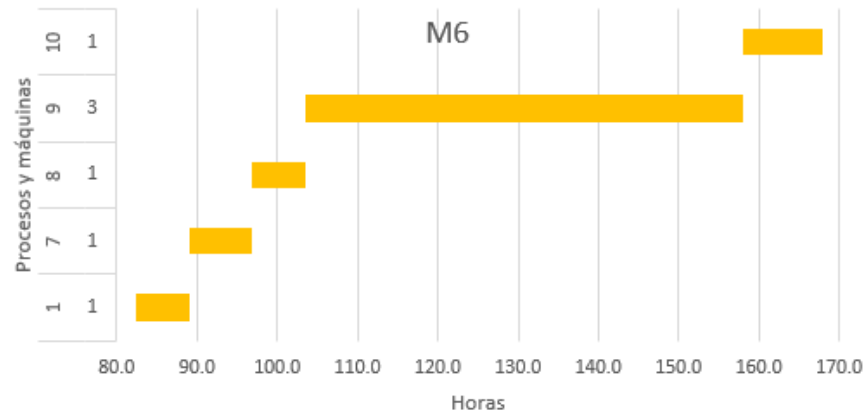


Figura 9 Resultados variables s y e de la marca M6. Autor

Para verificar el comportamiento del modelo se ejecutaron algunos escenarios de prueba simulando por ejemplo saturación de los equipos de filtración, problemas de llenado en las líneas de envase e incrementos de la demanda de productos. Cada uno de dichos escenarios causan alteración en los flujos de tratamiento y, por lo tanto, incremento en los tiempos de proceso.

Las figuras 10 y 11 de la marca M14 demuestran la variación de los tiempos de filtración al simular una saturación en los filtros.

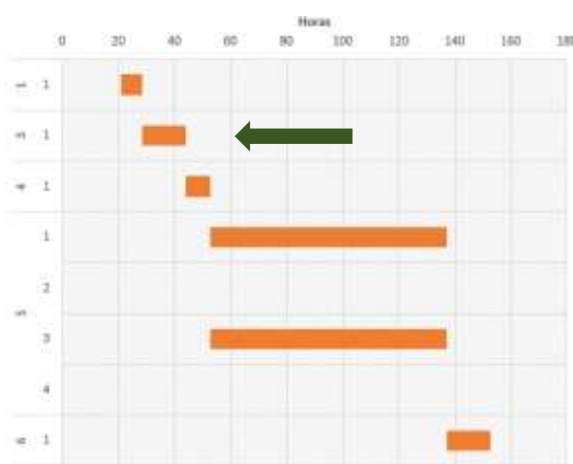


Figura 10 Programa de M14 flujo normal. Autor

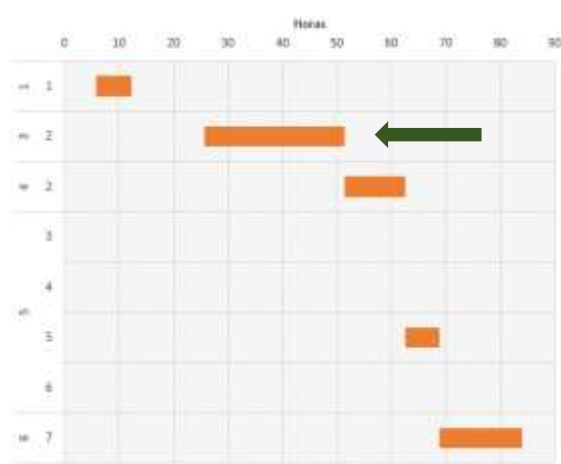


Figura 11 Programa de M14 con saturación en el equipo. Autor

Del mismo modo, las figuras 12 y 13 de la marca M13 demuestran la variación de los tiempos de envasado al simular una disminución en los flujos de las líneas de envase.

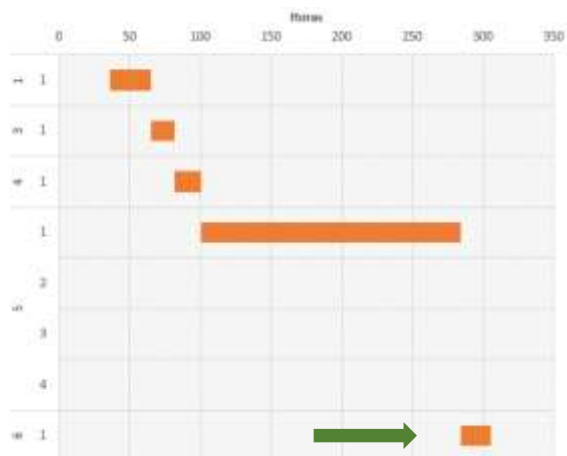


Figura 12 Programa de M13 flujo normal. Autor

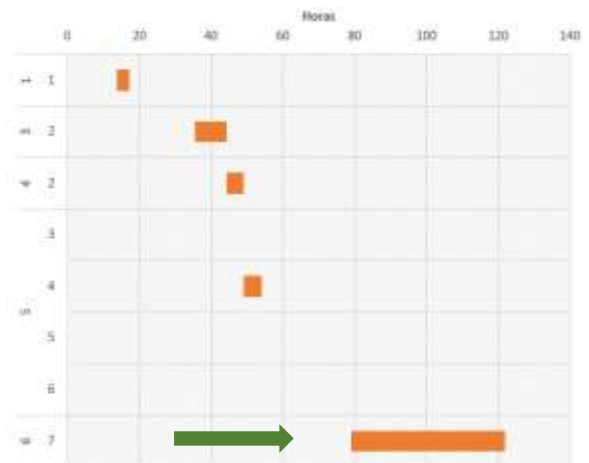


Figura 13 Programa de M13 con disminución de flujo en envase

Luego de someter el modelo a las pruebas descritas anteriormente, se procedió a ejecutarlo con los datos y parámetros nominales del proceso para extraer los valores de tiempo de inicio y finalización de cada una de las marcas en cada uno de los procesos y máquinas, con el fin de organizarlos y generar un diagrama general de producción tipo diagrama de Gantt y determinar el rango de tiempo donde se ejecute el plan de limpiezas requerido para garantizar la desinfección de los equipos y la inocuidad de los productos.

La figura 14 representa el programa general de producción de la categoría Maltas, en el cual, se observa que la marca ficticia M17 se activa al mismo tiempo en los tres procesos en el instante 91, este instante de tiempo representa la brecha en la programación en donde es posible ejecutar el plan de aseos del bloque de distribución de agua carbonatada.

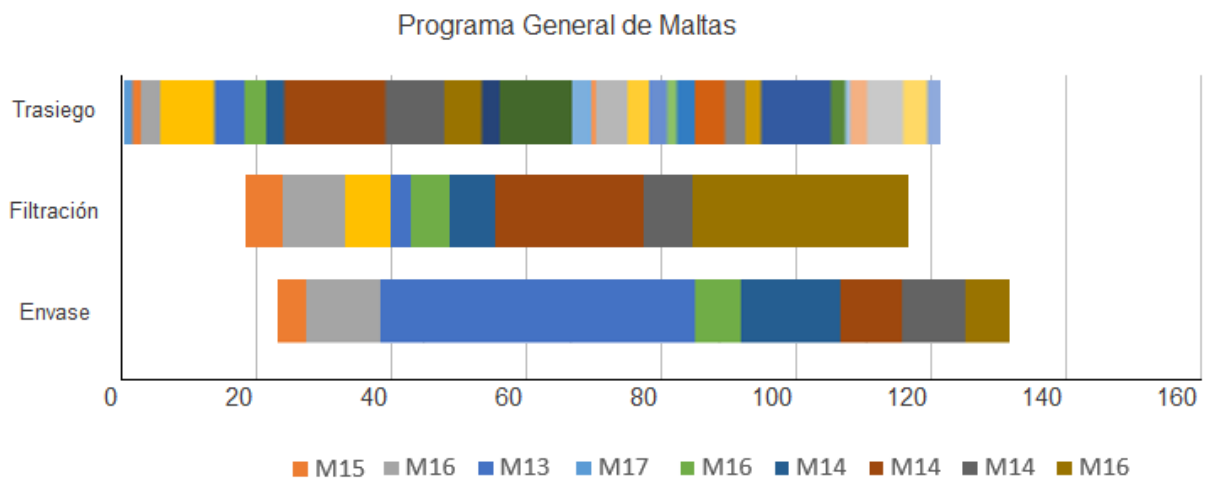


Figura 14 Programa general de Maltas. Autor

Debido a que el volumen de producción de la categoría Maltas es relativamente bajo, también se puede observar que este proceso ofrece otras brechas amplias de tiempo donde pueden ejecutarse las limpiezas requeridas y cumplir con el plan que exige la compañía.

La figura 15 representa el programa general de producción de la categoría Cervezas, en donde también se observa la marca ficticia M17 activarse en el instante 91 de tiempo, donde es posible realizar la limpieza requerida al bloque de distribución de agua carbonatada demostrando así la posibilidad de integrar los planes de limpieza a la programación de la producción.

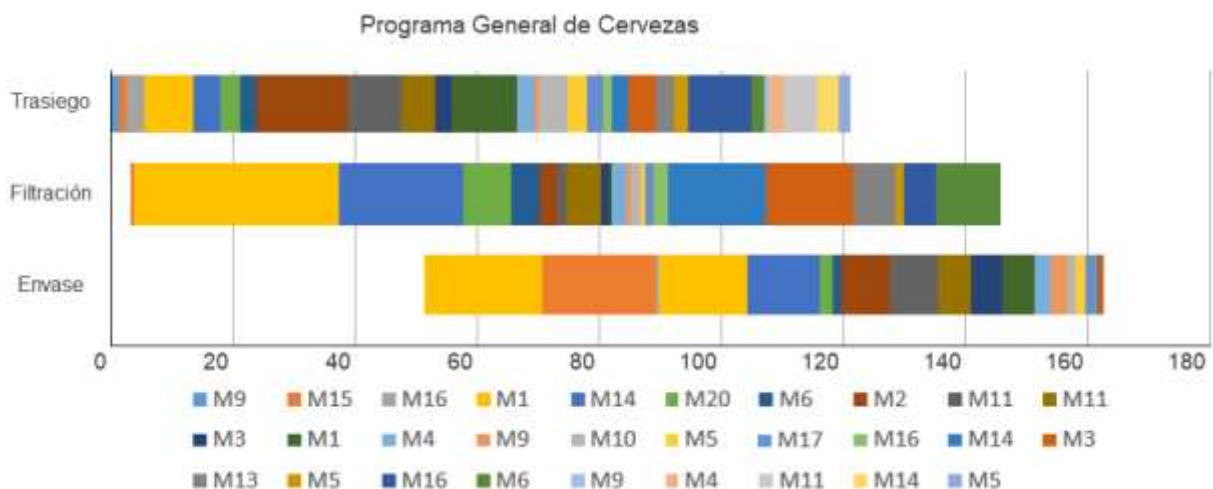


Figura 15 Programa general de Cervezas. Autor

En este programa de producción de la categoría Cervezas se evidencia que es más complejo debido al volumen de demanda y la variedad de marcas que deben fabricarse, sin embargo, se observa que también existen otras brechas de tiempo suficientes para ejecutar los respectivos planes de limpieza requeridos por las políticas de la compañía.

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En el presente trabajo se ha propuesto una metodología para mejorar la programación de la producción en una compañía cervecera de la región con el fin de demostrar que es posible llevar a cabo la ejecución del plan de limpiezas que exige la compañía y garantizar en todas las etapas del proceso la inocuidad del producto, sin la necesidad de llegar al punto de padecer el “síndrome de fin de mes” (Spieckermann & Stobbe, 2012), el cual consiste en realizar al final del mes todas las limpiezas programadas para cumplir con el indicador y paralelamente retrasar la programación de la semana siguiente.

Se caracterizó el proceso de filtración de cerveza mediante la figura 7 analizando cada una de sus variables y parámetros de las máquinas involucradas, generando una serie de conjuntos y vectores de parámetros necesarios para la modelación, asimismo fueron identificadas toda una serie de restricciones tales como partición de lotes, de capacidad, de tiempos, de traslape, entre otros, que permitieron la correcta secuenciación de cada uno de los procesos.

El modelo propuesto representa el problema planteado debido a que respondió adecuadamente a las condiciones nominales del proceso y a las demandas de productos promedio de cada semana.

Además, dicho modelo matemático es sensible a los cambios en los parámetros de producción, demostrando que sus resultados cambian al alterarse las variables del proceso tales como los flujos de filtración y los flujos de envase, lo cual es muy común

que se presente. Así mismo se observan cambios al alterar los valores del volumen de demanda de cada una de las marcas.

Cabe resaltar en la Figura 15 del programa general de cervezas, que el cumplimiento de cada uno de los procesos no supera el horizonte de planeación de la semana establecido en 168 h. Lo que significa que con la organización adecuada de las tareas es posible no solo cumplir con las limpiezas, sino que también son factibles las brechas de tiempo para la ejecución de mantenimientos preventivos a las máquinas involucradas en todo el proceso, dando espacio a otras áreas de la compañía que velan por la confiabilidad de los equipos mediante los planes de TPM, entre otros.

Para futuras investigaciones respecto al tema, se espera que se creen modelos matemáticos centrados principalmente en la comparación de los diferentes solvers que existen en el mercado tales como: Minos, Cplex, entre otros para evaluar el que mejor se adapte a los requerimientos de este tipo de industria y mejore los tiempos de proceso de tal manera que puedan procesarse una mayor cantidad de marcas dado que las empresas de este tipo tienden a desarrollar nuevos productos bajo otras condiciones de proceso.

Según la literatura analizada, existen diversos trabajos en el mismo campo con algoritmos desarrollados por los autores, por lo tanto, sería pertinente realizar un estudio enfocado en poner a prueba esos algoritmos al actual proceso para determinar alguno que se adapte y pueda ser utilizado y mejorado para posiblemente expandir el alcance de tales investigaciones.

Con los resultados del presente documento, se recomienda a la empresa un estudio más detallado abarcando todo el proceso desde su inicio, es decir, desde la cocción del mosto para buscar una mejor sincronización entre las áreas productivas del proceso en general. Dicho estudio podría mejorar otros indicadores como tiempos de ocupación en cavas, mejoramiento del backlog, mantener controlado el makespan que a su vez se verían reflejados en indicadores de consumo de energía y fluidos.

7. BIBLIOGRAFÍA

- Alfonso, H., Vivas, H., & Rozo, A. P. (2004). *Química de Cervecería* (1a ed.). Bogotá DC: Grupo Empresarial Bavaria.
- Baldo, T. A., Morabito, R., Santos, M. O., & Guimarães, L. (2017). Alternative Mathematical Models and Solution Approaches for Lot-Sizing and Scheduling Problems in the Brewery Industry: Analyzing Two Different Situations. *Mathematical Problems in Engineering*, 2017. <https://doi.org/10.1155/2017/6754970>
- Baldo, T. A., Santos, M. O., Almada-Lobo, B., & Morabito, R. (2014). An optimization approach for the lot sizing and scheduling problem in the brewery industry. *Computers and Industrial Engineering*, 72(1), 58–71. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2014.02.008>
- Cui, W. (2020). Approximate Approach to Deal with the Uncertainty in Integrated Production Scheduling and Maintenance Planning. *Journal of Shanghai Jiaotong University (Science)*, 25(1), 106–117. <https://doi.org/10.1007/s12204-019-2086-2>
- Distilling, I. of B. and. (2014). *Elaboración de Cerveza* (p. 400). IBD Titualciones.
- Esslinger, H. M. (2015). *Handbook of Brewing. Climate Change 2013 - The Physical Science Basis* (1a ed., Vol. 1). Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Gallego, R., Toro, E., & Escobar, A. (2015). *Técnicas Heurísticas y Metaheurísticas* (1a ed.). Pereira: Universidad Tecnológica de Pereira.
- Georgiadis, G. P., Elekidis, A. P., & Georgiadis, M. C. (2021). Optimal production planning and scheduling in breweries. *Food and Bioproducts Processing*, 125, 204–221. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2020.11.008>
- Guimarães, L., Klabjan, D., & Almada-Lobo, B. (2012). Annual production budget in the beverage industry. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 25(2),

229–241. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2011.05.011>

Hillier, F., & Lieberman, G. (2010). *Introducción a la Investigación de Operaciones* (9a ed.). México: McGraw-Hill Interamericana.

Kunze, W. (2006). *Tecnología para Cerveceros y Malteros* (1a ed.). Berlín: VLB Berlín.

Machuca, & Dominguez, Jose Antonio, Dominguez, Miguel, García, Santiago, Ruiz, A. (1994). *Dirección de operaciones aspectos tácticos y operativos*. Madrid: McGraw-Hill Interamericana.

Pagliarussi, M. S., Morabito, R., & Santos, M. O. (2016). Otimização da programação da produção de bebidas à base de frutas por meio de modelos de programação inteira mista. *Gestão & Produção*, 24(1), 64–77. <https://doi.org/10.1590/0104-530x2288-15>

Pinedo, M. L. (2016). Scheduling: Theory, algorithms, and systems, fifth edition. *Scheduling: Theory, Algorithms, and Systems, Fifth Edition*, 1–670. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-26580-3>

Sáenz-Alanís, C. A., Jobish, V. D., Salazar-Aguilar, M. A., & Boyer, V. (2016). A parallel machine batch scheduling problem in a brewing company. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 87(1–4), 65–75. <https://doi.org/10.1007/s00170-016-8477-8>

Sipper, D., & Bulfin, R. (1998). *Planeación y Control de la Producción*. México DF: McGraw-Hill Interamericana.

Spieckermann, S., & Stobbe, M. (2012). *Applications of discrete-event simulation in the chemical industry*. (S. Bangsow, Ed.), *Use Cases of Discrete Event Simulation: Appliance and Research* (Vol. 9783642287). https://doi.org/10.1007/978-3-642-28777-0_14

Toscano, A., Ferreira, D., & Morabito, R. (2019). A decomposition heuristic to solve the two-stage lot sizing and scheduling problem with temporal cleaning. *Flexible Services and Manufacturing Journal*, 31(1), 142–173.

<https://doi.org/10.1007/s10696-017-9303-9>

- Wu, O., Dalle Ave, G., Harjunoski, I., Bouaswaig, A., Schneider, S. M., Roth, M., & Imsland, L. (2020). Optimal production and maintenance scheduling for a multiproduct batch plant considering degradation. *Computers and Chemical Engineering*, 135, 106734. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2020.106734>
- Xu, S., Dong, W., Jin, M., & Wang, L. (2020). Single-machine scheduling with fixed or flexible maintenance. *Computers and Industrial Engineering*, 139(November 2019), 106203. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2019.106203>