

Simulación del proceso de embotellado y embarrilado de Cerveza Artesanal

Coali Nicolas Ezequiel¹, Orellano Diego Maximiliano, Paz Enrique Eduardo

¹ Facultad de Ciencias Exactas y Tecnologías, Universidad Nacional de Santiago del Estero, A. Belgrano (S) 1912, Santiago del Estero, Argentina.
{nico.coali,maxi.orellano,enriquepaz.inbox}@gmail.com
<http://www.fce.unse.edu.ar/fceyt/>

Resumen. El presente trabajo fue desarrollado durante el cursado de la materia Simulación, correspondiente al cuarto año de la carrera Licenciatura en Sistemas de información, de la Facultad de Ciencias Exactas y Tecnologías de Universidad Nacional de Santiago del Estero, en el transcurso del año 2017. El objetivo del trabajo fue la aplicación de los conocimientos adquiridos en la asignatura para contribuir a la solución de una problemática local. Se eligió entonces la aplicación de la técnica de Simulación con Dinámica de Sistemas para abordar el problema de la producción de Cerveza Artesanal. Para ello se exponen conceptos claves sobre simulación y Dinámica de Sistemas. Se presentan los diferentes modelos obtenidos de la aplicación de la metodología de Dinámica de Sistemas, haciendo énfasis en el proceso de embarrilado y embotellado de cerveza; se describen los escenarios de simulación y se muestran los resultados obtenidos en la ejecución del simulador. Se muestra el análisis de los resultados y las conclusiones a las que se arriba y que permitirían optimizar el problema real.

1. Introducción

En la industria cervecera es importante respetar los tiempos de producción para poder obtener un producto con las características deseadas, lo que lleva a las empresas a tener su stock estacionado por un tiempo después del envasado. A raíz de esto, muchas veces se producen demandas insatisfechas. En consecuencia, se vuelve relevante encontrar un punto de equilibrio entre los tiempos necesarios para producir y la satisfacción de la demanda.

Surge entonces la Simulación, como una técnica alternativa que permitiría obtener información para soportar la toma de decisiones en este sentido. La Simulación se define como el proceso de diseñar y desarrollar un modelo computarizado de un sistema o proceso y conducir experimentos con este modelo con el propósito de entender el comportamiento del sistema, o evaluar varias estrategias con las cuales se puede operar el sistema [1].

Creemos conveniente simular esta problemática para aprovechar las ventajas de la Simulación ahorrando gastos de implantación de nuevo equipamiento y formas de trabajar nuevas, las cuales en caso de no ser efectivas para la empresa productora de

cerveza, la llevaría a incurrir en costos prácticamente irrecuperables, traduciéndose en pérdidas para el negocio.

Consideramos que en este problema es factible aplicar la Dinámica de Sistemas ya que el problema es un sistema dinámico porque el entorno en que se aplica es complejo y poco definido, donde las decisiones del ser humano modifican el estado del sistema. Es un sistema donde la evolución se realiza a partir de la evolución de las variables independientes. así también se observa que existen retardos en la transmisión de los flujos y bucles de realimentación.

Este trabajo se organiza de la siguiente manera. En la sección 2 se introducen los conceptos teóricos principales de la Simulación y la Dinámica de Sistemas (DS), en la sección 3 se presentan antecedentes sobre trabajos relacionados y en la sección 4 se describe el proceso de elaboración de la cerveza artesanal, el problema a abordar y los objetivos con sus restricciones, mientras que la sección 5 trata el modelado con Diagramas Causales y Diagramas de Forrester presentando el escenario inicial. En la sección 6 se proponen los ajustes del modelo, definiendo los factores experimentales, al final, una comparación de resultados nos permitirá esbozar una conclusión para cerrar el presente trabajo, demostrando así que la implementación de la simulación resultó satisfactoria.

2. Marco Referencial

En esta sección se presentan los principales conceptos que dieron sustento al desarrollo de este trabajo.

2.1 Simulación

La Simulación se define como una experimentación en computadora, con una imitación simplificada (modelo) de la evolución de un sistema en el tiempo, con el fin de comprender y/o mejorar tal sistema. A su vez, la simulación genera diversos posibles estados futuros del sistema cuando las ecuaciones de comportamiento son borrosas y/o no tiene un control efectivo sobre las variables [2].

Las principales ventajas de la Simulación desde una perspectiva de experimentación con el sistema real, disminuye costos, acorta tiempos, permite controlar las condiciones de experimentación y permite simular sistemas que no existen en la realidad. Frente a otros enfoques de modelado nos brinda la posibilidad de modelar la variabilidad, asunción de restricciones y nos brinda una mayor transparencia [2].

En cuanto a las desventajas de simular podemos encontrar que esta práctica resulta cara de realizar, sin embargo, no es comparable con los costos en los que se incurriría al montar los escenarios simulados en un mundo real. Por otra parte, consume tiempo y requiere experticia para la observación y recolección de información [2].

2.2 Dinámica de Sistemas

La DS es una metodología que se articula con el análisis y la síntesis, y que posibilita analizar cómo, las relaciones en el seno de un sistema permiten explicar su

comportamiento [3]. Esta metodología encuentra sus principales aplicaciones en entornos complejos y poco definidos donde intervienen las decisiones del ser humano que suelen estar guiadas por la lógica. El objetivo básico de la DS es llegar a comprender las causas estructurales que provocan el comportamiento del sistema. Esto implica aumentar el conocimiento sobre el papel de cada elemento del sistema, y ver cómo diferentes acciones, efectuadas sobre partes del sistema, acentúan o atenúan las tendencias del comportamiento implícitas en el mismo. Una característica básica es su enfoque a largo plazo, por lo que resulta beneficioso utilizar la DS, ya que, identificando correctamente todas las variables, es posible observar todos los aspectos significativos de la evolución del sistema.

La DS posee ciertas etapas metodológicas para la construcción de un modelo [2]:

Identificación del problema: Se identifica el problema y se describe con precisión el objetivo. En esta etapa se decide si es necesario aplicar la DS.

Descripción del sistema: En esta etapa se establecen los límites de acuerdo con los objetivos, se identifican los elementos constituyentes y las relaciones entre estos.

Construcción del Diagrama Causal: Es un modelo formalizado de los elementos del sistema y las relaciones entre ellos, haciendo constar el signo de variación esperado entre cada par de elementos, y la existencia de bucles de realimentación positivos y/o negativos.

Construcción del diagrama de Forrester: Es una traducción del Diagrama Causal a una terminología que permite la escritura de las ecuaciones en el ordenador para así poder validar el modelo, observar la evolución temporal de las variables y hacer análisis de sensibilidad.

Definición precisa de cada magnitud: Se confecciona una tabla donde se visualicen las variables con su respectivo identificador, descripción, tipo y unidad de medida.

Definición del Modelo Matemático.

Calibrado: Una vez finalizada esta etapa se habrán establecido las formas de las funciones y los valores de los parámetros precisados al máximo.

Análisis de sensibilidad: Con el análisis de sensibilidad se estudia cómo varían las variables endógenas ante variaciones pequeñas de los parámetros.

Evaluación del modelado contrastado: Es el contraste de las respuestas del modelo con los hechos observados.

Utilización del modelo: Es la etapa de justificación de la construcción del modelo, donde se procede a la generación de variables endógenas a partir del modelo, con diversas hipótesis alternativas de conjuntos coherentes de valores de las variables exógenas y parámetros.

3. Trabajos Relacionados

En esta sección se presentan algunos antecedentes vinculados al presente trabajo. En principio se citan algunos trabajos sobre simulación del proceso de fabricación de la cerveza con otras metodologías, se puede mencionar a:

El trabajo presentado en [5], donde se muestra la simulación del proceso de producción de cerveza a escala piloto realizado en la Planta piloto de Ingeniería de

Procesos de la Universidad de Camagüey, en la línea de producción de cerveza. Se plantea como objetivo de la investigación: simular el proceso de producción de cerveza para el análisis de la influencia de las principales variables de operación, sobre la eficiencia técnica, económica y ambiental. Para la simulación se creó una herramienta informática desarrollada en SuperPro Designer. Se analizó un caso base (proceso de fabricación actual en la planta) y dos variantes tecnológicas.

En [6], se presenta la simulación del Proceso Fermentativo de la Cerveza en la Fábrica Tímina. Se simula la etapa fermentativa de la producción de cerveza Tímina de 10° con formulación 70/30, para la determinación de los valores de las variables de operación que hacen el proceso eficiente técnica y económicamente. Se realizaron fermentaciones experimentales, se empleó un diseño experimental con el uso del Statgraphics Plus V 5.1 considerando un factor categórico individual totalmente aleatorizado.

Por último, sólo se encontró un trabajo [7], que simula el Proceso productivo de la cerveza aplicando DS. En el mismo, se presenta el Modelo de Producción de cervecera condicionada por políticas de abastecimiento. Se enfocó en realizar un modelo de simulación basado en DS del proceso de producción y venta de cerveza en envases retornables de una prestigiosa empresa cervecera.

4. Descripción del Problema

4.1 El proceso de la elaboración de cerveza artesanal

La elaboración de cerveza artesanal inicia con la selección y molienda del grano de cebada malteada, el cual será sometido a un proceso de macerado, donde se extraerán los azúcares fermentables que luego actuarán durante la fermentación, una vez terminado el macerado, el mosto que se encuentra a 65°, pasa a la fase de hervor, donde se desactivan ciertas enzimas y se produce la esterilización del mosto, allí se adiciona el lúpulo de acuerdo al estilo de cerveza deseada para llegar al amargor y aroma deseado. Una vez terminada esta etapa se lleva a cabo el enfriado de la cerveza la cual será almacenada en fermentadores donde se agrega la levadura, la cual generará alcohol y dióxido de carbono como producto de la fermentación, esta etapa dura aproximadamente siete días, luego de esto la cerveza pasa a la etapa de madurado, la cual dura aproximadamente otros siete días, una vez terminado este proceso la cerveza se filtra y pasa a un tanque de cerveza brillante, la cual está lista para ser carbonatada y consumida.

4.2 Delimitación del Problema

El problema identificado comienza una vez terminada la etapa de producción, cuando la cerveza brillante (luego de atravesar el proceso de fermentación, maduración y filtrado) es recibida para llevar a cabo el proceso de embotellado y embotellado. En esta etapa de envasado se reciben 150 litros cada 15 días, de los cuales el 20% se destina a botellas y el 80% restante se envía a barriles, las botellas deben permanecer estacionadas por un período de dos semanas para que logre una carbonatación óptima, luego de esto están listas para la venta. El embotellado depende del stock disponible

de botellas vacías, las cuales pasan por un proceso de esterilización antes de ser llenadas.

En cuanto al proceso de embotellado, los barriles se carbonatan inyectando CO₂ a una determinada presión y son enviados a una cámara de frío donde permanecerán estacionados por dos días. Terminado este tiempo están listos para la venta. Este proceso también depende de los barriles vacíos con los que se disponga, cada barril tiene una capacidad máxima de 20 litros.

Se sabe que existe una demanda de 200 litros semanales de cerveza, de los cuales el 60% es demanda de barril y el 40% restante es demanda de botellas.

La recepción de la cerveza se realiza para reponer los litros embotellados y embotellados. La compra de botellas y barriles se realiza en función del dinero que se recaude con la venta de barriles y botellas es decir que mayor cantidad de fondos, más cantidad de botellas y barriles se pueden adquirir.

Puntualmente el problema consiste en encontrar la mejor combinación entre cantidades a producir para embotellar y embotellar y minimizar la demanda insatisfecha, considerando los tiempos necesarios de producción y estacionamiento.

4.3 Objetivos y restricciones

Con el fin de maximizar los ingresos de la empresa, se establece el siguiente objetivo para el simulador: *Reducir la demanda insatisfecha de barriles y botellas en un 50%.*

La empresa plantea como restricción que sólo puede enviar a envasado la cerveza cada 15 días debido a los tiempos en necesarios en el proceso productivo para concretar el fermentado, madurado y filtrado.

5. Modelado del Problema

Tanto para el modelado del problema como para la construcción del simulador se utilizó el software Evolución.

5.1 Diagrama Causal

El diagrama causal es un diagrama que recoge los elementos clave del sistema y las relaciones entre ellos. Las relaciones están representadas por flechas entre variables acompañadas de un signo (“+” o “-”) que indica el tipo de influencia ejercida por una variable sobre otra. Además, una cadena cerrada de relaciones causales recibe el nombre de bucle de retroalimentación. Los bucles pueden ser “positivos” que implican desequilibrio en el comportamiento “negativos” que implican mantenimiento del equilibrio. La utilidad más importante de esta concepción es comprender cómo la estructura de los sistemas provoca su comportamiento [4].

La Figura 1 muestra el diagrama causal para el problema, en el cual quedan explícitas las variables identificadas y los flujos entre las mismas, de qué tipo son, como así también los retardos de información.

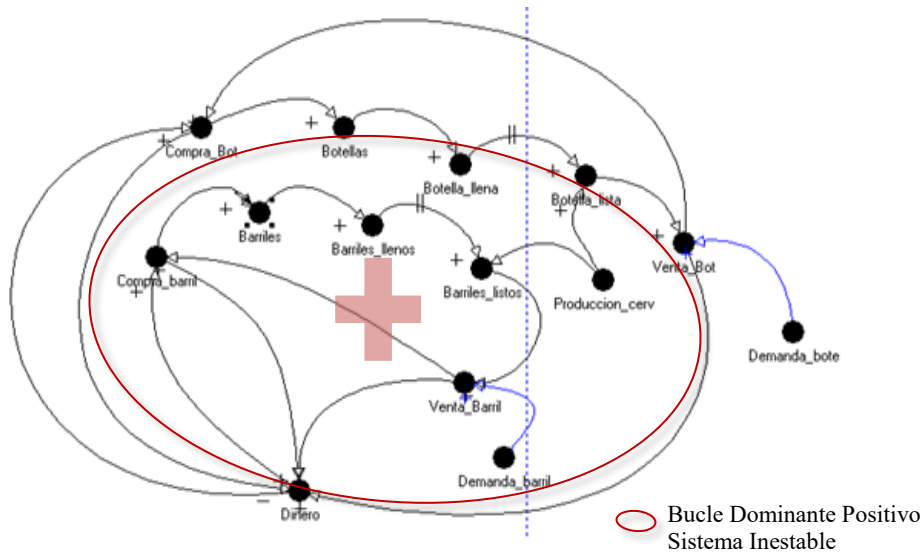


Fig. 1: Diagrama causal del escenario inicial

5.2 Diagrama de Forrester

El Diagrama de Forrester (DF) es característico de la DS. Es una traducción del diagrama causal, el cual nos permite observar la evolución temporal de las variables y hacer un análisis de la sensibilidad. Sus componentes son: Los “niveles”, representados por un rectángulo, son aquellos elementos que nos muestran en cada instante la situación del modelo, presentan una acumulación de material. Las “nubes” dentro del diagrama de flujos son niveles de contenido inagotable. Los “flujos” son elementos que pueden definirse como funciones temporales, que recogen las acciones resultantes de las decisiones tomadas en el sistema, determinando las variaciones de los niveles. Las “variables auxiliares” y las “constantes”, son parámetros que permiten una visualización mejor de los aspectos que condicionan el comportamiento de los flujos. Las magnitudes físicas entre flujos y niveles se transmiten a través de los denominados “canales materiales”. Por otra parte, existen los llamados “canales de información”, que transmiten, como su nombre indica, informaciones que por su naturaleza no se conservan. Los “retardos”, son funciones que simulan las demoras en la transmisión de materiales o informaciones [4]. La Figura 2 muestra el DF del modelo de envasado de la cerveza, en el cual se pueden apreciar los principales flujos de material que circulan por el sistema: cerveza, barriles, botellas y dinero. Así como los flujos de información entre las distintas variables.

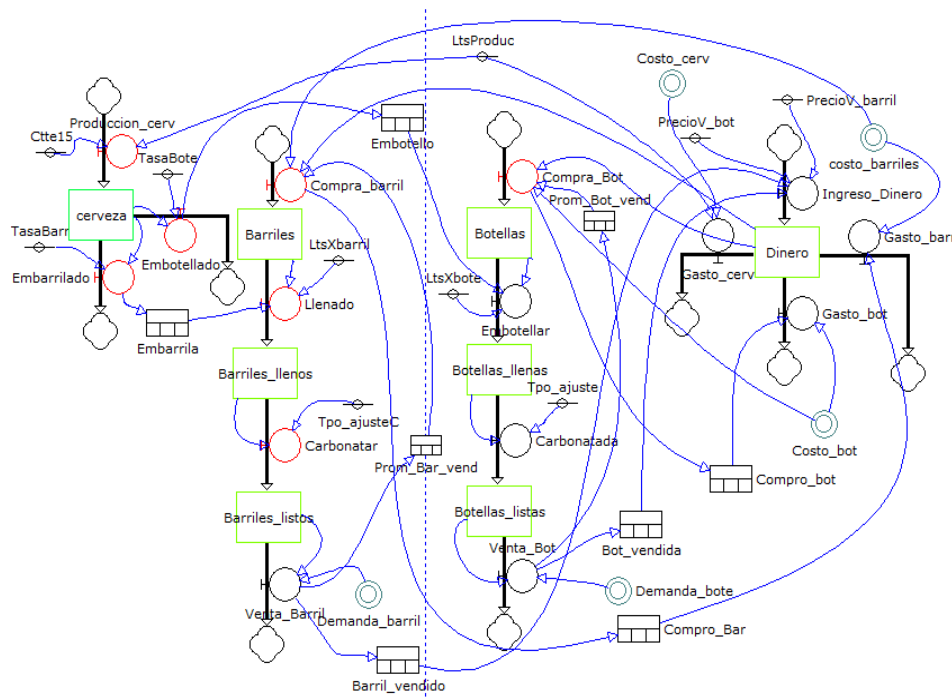


Fig. 2: Diagrama de Forrester del escenario inicial

5.3 Modelo matemático

A título de ejemplo se muestran algunas variables definidas en el modelo matemático con el software Evolución.

Compra_Bot :Flujo

Definición = $\text{IF}(\text{Dinero} \geq (\text{Prom_Bot_vend} * \text{Costo_bot}), \text{Prom_Bot_vend}, (\text{INT}(\text{Dinero} / \text{Costo_bot})))$

Demanda_bote :Exogena

Definición = $\text{INT}(\text{RANDOM}(20,35))$

Embotellar :Flujo

Definición = $\text{IF}((\text{Botellas} \geq (\text{Embotello} / \text{LtsXbote})), (\text{INT}(\text{Embotello} / \text{LtsXbote})), (\text{INT}(\text{Botellas})))$

Gasto_cerv :Flujo

Definición = $\text{IF}(\text{MOD}(T,15)=0, (\text{Costo_cerv} * \text{LtsProduc}), 0)$

Ingreso_Dinero :Flujo

Definición = $(\text{Bot_vendida} * \text{PrecioV_bot}) + (\text{Barril_vendido} * \text{PrecioV_barril})$

Venta_Bot :Flujo

Definición = $\text{IF}((\text{INT}(\text{Botellas_listas}) \geq \text{Demanda_bote}), (\text{Demanda_bote}), (\text{INT}(\text{Botellas_listas})))$

6. Diseño de Experimentos y Escenarios

6.1 Escenario inicial

En el escenario inicial se simularon 60 días. Para ello, en base a los datos recolectados del sistema real, se definen como parámetros 150 litros de cerveza iniciales,

recibiendo la misma cantidad cada 15 días. De estos el 20% se destina a botellas y el 80% restante se envía a barriles.

La demanda actual es de 200 litros semanales, de los cuales el 60% corresponde a demanda de barriles y el 40% restante a demanda de botellas.

A partir de esto, la recepción de cerveza se realiza para reponer los litros embotellados y embarrilados, mientras que la compra de botellas y barriles vacíos se realiza en función del dinero que se recaude de las ventas.

Los resultados obtenidos mediante la simulación con el software Evolución, aplicando el modelo diseñado y los parámetros del escenario inicial, se muestran en la Tabla 1 y en la Figura 3. Se presentan de manera resumida los resultados obtenidos de las 4 quincenas simuladas; es decir, el total de demanda y venta para las Botellas y Barriles en cada quincena, y así también los mismos totales para los 60 días de simulación. Además, la Tabla permite contrastar el dinero que la empresa se está privando de ganar, teniendo en cuenta el precio de venta al público de barriles a \$1400 y de botellas a \$40.

Tabla 1: Resumen de los resultados obtenidos de la simulación del escenario inicial, incluyendo la diferencia del dinero.

QUINCENA	BOTELLAS				BARRILES			
	Demandadas	Vendidas	Ingreso	Diferencia*	Demandadas	Vendidas	Ingreso	Diferencia
Primera	366	44	\$ 1760	\$ 12880	18	5	\$ 7000	\$ 15600
Segunda	396	71	\$ 2840	\$ 13000	18	6	\$ 8400	\$ 16800
Tercera	429	77	\$ 3080	\$ 14080	17	6	\$ 8400	\$ 16800
Cuarta	393	79	\$ 3160	\$ 12560	15	6	\$ 8400	\$ 16800
Total (60 días)	1584	271	\$ 10840	\$ 52520	68	23	\$ 32200	\$ 66000

*Diferencia: Es el dinero que la empresa no ingresa por no poder cubrir con la demanda insatisfecha.

En la Figura 3 se puede observar la marcada diferencia de demanda de botellas (gráfica roja) y la venta de estas (gráfica azul). A su vez, se observa que la relación entre la demanda (gráfica verde) y la venta de barriles (gráfica lila) no tiene una diferencia tan importante como la de demanda y venta de botellas, pero aun así es significativa. La demanda insatisfecha de botellas es de 1313 unidades y la de barriles es de 45.

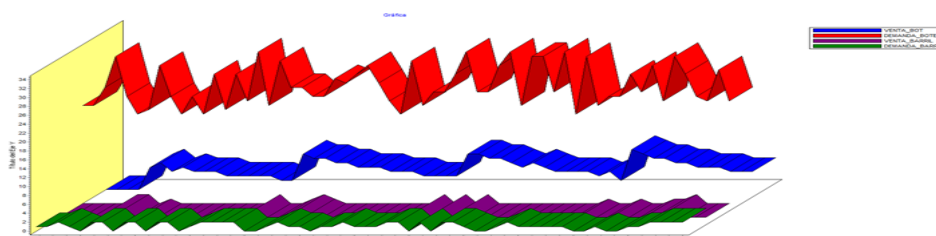


Fig. 3: Gráfica de los resultados obtenidos en la simulación del escenario inicial con el software Evolución.

6.2 Ajustes del modelo

En el escenario inicial llegan al proceso de envasado 150 litros, los cuales se reponen cada 15 días, esta cantidad implica tener un stock fijo y constante de botellas y barriles después de cada producción, dado que la demanda insatisfecha no era tomada en cuenta. Esto genera pequeños márgenes de ganancia, clientes no conformes con los plazos de entrega y se desaprovecha la alta aceptación del producto en el mercado.

Como ajuste del modelo se propone definir como factor experimental la cantidad de cerveza a solicitar al sistema productivo. Se propone que la primera recepción de cerveza a envasar sea de 300 litros, en lugar de los 150 litros del escenario inicial. Para las posteriores tandas se tendrá en cuenta, además del dinero disponible, la sumatoria de los litros de cerveza vendidos y la demanda insatisfecha, es decir que se producirá en base al total de demanda de la producción anterior. La recepción de la producción se continuará realizando cada 15 días.

Además, como el aumento de los litros de cerveza disponible para envasado demandará una mayor cantidad de botellas y barriles vacíos, se realiza la compra de estos bajo el mismo criterio que para la producción de cerveza.

A su vez, se propone modificar los porcentajes de cerveza destinados a barriles y botellas a un 60% y 40% respectivamente.

En la Tabla 2 y en la Figura 4 se exponen los resultados obtenidos mediante la simulación del segundo escenario. En la misma se muestra de manera resumida los resultados obtenidos de las 4 quincenas simuladas con Evolución. Es decir, el total de demanda y venta para las Botellas y Barriles en cada quincena, y así también los mismos totales para los 60 días de simulación. Igualmente, tal como se hizo en el análisis del escenario inicial, podemos determinar el dinero ingresado por las ventas y el que no se logra ingresar debido a la demanda no cubierta.

Tabla 2: Resumen de los resultados obtenidos de la simulación del segundo escenario.

QUINCEN A	BOTELLAS				BARRILES			
	Demandada s	Vendida s	Ingreso s	Diferencia *	Demandada s	Vendida s	Ingreso s	Diferencia *
Primera	295	180	\$ 7200	\$ 4600	16	8	\$ 11200	\$ 11200
Segunda	399	294	\$ 11760	\$ 4200	18	13	\$ 15600	\$ 7000
Tercera	411	360	\$ 14400	\$ 2040	21	15	\$ 21000	\$ 8400
Cuarta	418	384	\$ 15360	\$ 1360	12	10	\$ 14000	\$ 2800
Total (60 días)	1523	1218	\$ 48720	\$ 12200	67	46	\$ 61800	\$ 29400

En la Figura 4 se pueden observar los picos de recepción (gráfica roja), las cuales varían de acuerdo a la demanda, y cómo disminuye notablemente la diferencia entre demanda de botellas (gráfica lila) y venta de botellas (gráfica azul) como también la diferencia entre demanda de barriles (gráfica fucsia) y la venta de barriles (gráfica verde). El total de demanda insatisfecha de botellas queda en 305 unidades y el Total de demanda insatisfecha de barriles en 21 unidades.

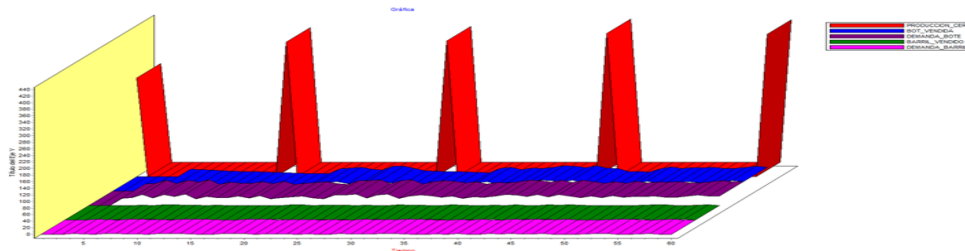


Fig. 4: Gráfico obtenido a partir de la simulación del escenario 2.

7. Análisis de los Resultados

En la Tabla 3 se presenta una comparación de los resultados obtenidos en la corrida del escenario inicial y el escenario 2, donde se ajusta el factor experimental.

Tabla 3: Comparación de los resultados de demandas insatisfechas obtenidos de la simulación de los dos escenarios

Variables resultado	Escenario original	Escenario 2	% reducido de demanda
Demanda Insatis. Botellas	1313	305	76.7%
Demanda Insatis. Barriles	45	21	53.3%

A su vez podemos comparar el dinero que ingresaba a la empresa como producto de la venta de botellas y barriles antes y después de implementar el factor experimental para visualizar como la solución planteada impacta en los números de la empresa.

Tabla 4: Comparación de los datos de ingreso de dinero entre los dos escenarios simulados.

Tipo Ingresos	Escenario original	Escenario 2	% aumento ingreso
Botellas	\$ 10840	\$ 48720	450 %
Barriles	\$ 32200	\$ 61800	192 %
Total	\$ 43040	\$ 110520	257 %

8. Conclusión

La parte más importante por destacar de este trabajo no son solo los resultados a los que arribamos, sino el desarrollo de este. Encontrar un problema real, poder analizarlo y brindar una posible solución aplicando la técnica que estudiamos en la cátedra, fue un desafío bastante complicado de llevar adelante para el equipo de trabajo.

Identificar soluciones factibles a implementar en la industria cervecera, puede ser una tarea muy complicada. Luego de finalizado este trabajo pudimos concluir que el factor experimental propuesto y los ajustes realizados sobre el modelo original ayudó a lograr los objetivos planteados. Como primera medida, modificar los porcentajes de la producción destinados a barril y a botellas permitió disminuir la demanda insatisfecha de botellas, que era mayor respecto a los barriles.

El otro aspecto considerado fue ajustar la producción a la demanda insatisfecha. Esto resultó una solución óptima.

Por lo tanto, concluimos que, el trabajo resultó exitoso ya que pudimos brindar a la industria que planteaba el problema una solución óptima que satisface las necesidades y se adapta a las restricciones planteadas inicialmente.

9. Referencias

1. Robert E. Shannon. Simulación de sistemas: diseño, desarrollo e implantación / traducción Fernando Aldrete Bernal. México: Trillas, 1988.
2. David Rios Insua, Sixto Ríos Insua, Jacinto Martín (1997) Simulación. Métodos y Aplicaciones (U1, U3). Ra-Ma, España.
3. Javier Aracil (1995) Dinámica de Sistemas. Madrid. Juan Martin García. Dinámica de Sistemas. Prólogo de John Sterman, director de System Dynamics, Group. MIT Sloan School of Management.
4. M. C. Julián-Ricardo, J. G. Baltá-García, E. J. Pérez-Sánchez y A. Pérez-Sánchez (2017), Simulación del proceso de producción de cerveza a escala piloto. Departamento de Ingeniería Química, Universidad de Camagüey, Cuba.
5. María Caridad Julián-Ricardo, Miguel Martínez-Robaina, Adisbel Almeida-Soto, Adelaide Girao-Orrutiniel, José Carlos García (2018), Simulación del Proceso Fermentativo de la Cerveza Típica de 10° con formulación 70/30. <http://scielo.sld.cu/pdf/rtq/v38n2/rtq13218.pdf>
6. Caminos, Andrés, Maimbil, Edgar, Romera, Nahuel, González, Magali, Forchino, Verónica. Modelo De Producción Cervecería Condicionada por Políticas de Abastecimiento. http://www.edutecne.utn.edu.ar/coini_2014/trabajos/C_003.pdf