

# **SIMULACIÓN DE SISTEMAS PRODUCTIVOS NO BALANCEADOS: APLICACIÓN A LA PRODUCCIÓN DE MEZCAL**

## *SIMULATION OF NONBALANCED PRODUCTION SYSTEMS: APPLICATION TO MEZCAL PRODUCTION*

***Luis Enrique Sandoval Ortega***

Tecnológico Nacional de México en Celaya  
*m1803012@itcelaya.edu.mx*

***Salvador Hernández González***

Tecnológico Nacional de México en Celaya  
*salvador.hernandez@itcelaya.edu.mx*

***José Enrique Botello Álvarez***

Tecnológico Nacional de México en Celaya  
*enrique.botello@itcelaya.edu.mx*

***José Alfredo Jiménez García***

Tecnológico Nacional de México en Celaya  
*alfredo.jimenez@itcelaya.edu.mx*

***Vicente Figueroa Fernández***

Tecnológico Nacional de México en Celaya  
*vicente.figueroa@itcelaya.edu.mx*

### **Resumen**

La simulación es aplicable a diferentes ramas técnicas del saber humano y por ende a sistemas administrativos y de negocios.

El contexto de su tratamiento permite lograr importantes ahorros y es una herramienta poderosa de apoyo para la toma de decisiones bajo la representación de diferentes escenarios y lapsos de tiempo donde los sistemas se tornan complejos por la gran cantidad de variables que en estos interactúan. Este proyecto expone el método para la construcción de un modelo de simulación utilizando el software ProModel para analizar sistemas de producción no balanceados, aplicado en una planta productora de Mezcal. El modelo asume que, los tiempos de proceso son deterministas. El estudio incluye una revisión de la literatura, conceptos de modelado y simulación, áreas de aplicación, análisis de datos, construcción de un

modelo de simulación y análisis de resultados. Como conclusión, los datos indican que un aumento en la capacidad de algunos equipos, se traduciría en un mejor desempeño del sistema.

**Palabras Clave:** Mezcal, Modelo, Simulación, ProModel, Sistemas de Producción No Balanceados.

## **Abstract**

*The simulation is applicable to different technical branches of human knowledge and therefore to administrative and business systems. The context of its treatment allows to achieve important savings and is a powerful support tool for decision making under the representation of different scenarios and time lapses where systems become complex due to the large number of variables that interact in them. This project exposes the method for the construction of a simulation model using ProModel software to analyze unbalanced production systems, applied in a Mezcal production plant. The model assumes that, the process times are deterministic. The study includes a review of the literature, concepts of modeling and simulation, areas of application, data analysis, construction of a simulation model and analysis of results. In conclusion, the data indicate that an increase in the capacity of some equipment, would result in a better performance of the system.*

**Keywords:** Mezcal, Model, Simulation, ProModel, Unbalanced Production Systems.

## **1. Introducción**

Actualmente las empresas se enfrentan a tres grandes retos: la optimización de recursos y procesos, la reducción de costos y disminución de riesgos, esto se debe al entorno actual que se encuentra tan globalizado y altamente competitivo. Es sin lugar a duda aquí donde las nuevas técnicas de simulación se implementan como una herramienta de gran aprovechamiento para el desempeño operacional con el fin de alcanzar estos objetivos a través de la experimentación y análisis de los procesos de manufactura donde se pueda conocer el comportamiento de las variables en el tiempo, realizar modificaciones experimentales de los parámetros del sistema y conocer las estadísticas e indicadores para tomar decisiones basadas en

información exacta y oportuna sin tener que generar cambios físicos que puedan entorpecer las operaciones.

Ahora bien, debido a los acelerados cambios dentro del contexto empresarial surge la importancia de estudiar e implementar un modelo como herramienta alternativa que plantee posibles propuestas a soluciones de problemas evaluados y ayude a la toma de decisiones basado en la experiencia adquirida durante la aplicación de la simulación, pero sin perder de vista las características y efectos del entorno específico.

Hoy en día el modelado de sistemas reales es un amplio campo de investigación cuyo desempeño depende en gran medida de parámetros aleatorios, como la demanda o el tiempo de servicio. Según Shannon, R. [15] modelado es el proceso de construcción de un modelo. Un modelo es una representación de un grupo de objetos, sistemas o ideas; usualmente, su propósito es ayudar a explicar, entender o mejorar un sistema.

El uso de modelos permite realizar estudios del comportamiento de un sistema bajo diversas condiciones de operación, sin necesidad de construir el sistema y someterlo a las condiciones de operación real.

Un modelo de simulación es una representación descriptiva de un proceso o sistema, que usualmente incluye parámetros para representar diferentes configuraciones del sistema o proceso.

A nivel de planificación y control estratégicos de una empresa, los modelos de simulación insertan varias entradas a un sistema y proporcionan un modelo para evaluar o volver a diseñar y medir o cuantificar factores tan importantes como la satisfacción del cliente, la utilización de recursos, el proceso de reingeniería y el tiempo invertido en todo ello. Si nos referimos al proceso de reingeniería o proceso de innovación, como a veces se le denomina, éste es un medio por el que las organizaciones intentan reinventarse. Este esfuerzo comporta procesos de replanteamiento, búsqueda de procesos innovadores y por ello más efectivos y eficientes de cara a ser productoras de mayor número de negocios.

El modelo de simulación consta de un conjunto de representaciones, expresadas como relaciones matemáticas, lógicas o simbólicas, entre las entidades que actúan

en el sistema. La simulación tiene, como una de sus grandes ventajas el hecho de que, construido un modelo, puede utilizarse repetidamente para experimentar diferentes alternativas, compararlas y apoyar decisiones, sin recurrir a un mayor uso de recursos [1], [12].

Los modelos de simulación utilizados en los procesos de manufactura son una herramienta de gran aprovechamiento para el desempeño operacional y control estratégico de una empresa. El uso de modelos de simulación puede reemplazar la realización de experimentos en sistemas reales y aquellos proyectos que aún se encuentran en fase de desarrollo [8], permitiendo experimentar, evaluar y comparar muchos sistemas alternativos [4].

Gracias a la simulación es posible tomar decisiones sobre probables cambios a efectuar en los procesos de manufactura sin tener que generar cambios físicos que puedan entorpecer las operaciones, mejorando la eficiencia e incrementando la moral en el lugar de trabajo. La simulación es una herramienta de carácter analítico que ha tenido un profundo impacto en el campo científico. Es la imitación de la operación de un proceso o sistema real a lo largo del tiempo, que genera una historia artificial del sistema y que, al ser analizado, permite extraer inferencias de las características del sistema real [1].

Los escenarios o estrategias definidos usando la simulación permiten obtener un análisis de sensibilidad de las diferentes variables, al alterar todos o algunos de los parámetros de entrada al sistema, permite obtener medidas de desempeño que reflejen la calidad del servicio prestado y la sensibilidad de los indicadores ante las variaciones del sistema. La técnica de elaboración de escenarios es un tema que ha sido tratado por varios autores. La simulación es una metodología que se ha popularizado en los últimos años, diversos procesos logísticos, productivos y de servicios han sido mejorados con la ayuda de la simulación y el modelaje matemático [14], [19], [20].

La simulación permite analizar la sensibilidad de los principales parámetros y variables del sistema, con el fin de definir diferentes modelos de planeación. Los escenarios muestran que es posible obtener una reducción del tiempo de proceso,

así como también mejorar los indicadores de servicio y como consecuencia aumentar la tasa de utilización de los recursos.

El modelado de sistemas reales cuyo desempeño depende en gran medida de parámetros aleatorios, como la demanda o el tiempo de servicio, es hoy un amplio campo de investigación, tanto para los desarrollos teóricos como para las aplicaciones. Para modelar y simular un sistema real, es necesario implementar un modelo matemático aplicado a la simulación, pueden ser utilizados lenguajes de programación como C++, Visual Basic, Pascal; o programas de simulación (tabla 1), por ejemplo, ProModel, FLEXSIM, Arena, Extend y SLAM [4].

Tabla 1 Resumen del software de simulación de procesos.

Simulador	Tipo de simulador	Campos de aplicación	Atributos sobresalientes	Plataforma
PROMODEL	Eventos discretos	Procesos manufactura, logística, manejo de materiales, etc.	<ul style="list-style-type: none"> <li>Animación de modelos bajo estudio.</li> <li>Importación de layout CAD, imágenes y fotografías digitales.</li> <li>Ofrece simulación basada en diagramas de flujo para procesos de negocio.</li> <li>Análisis estadístico de rendimientos, cuellos de botella, utilización, etc.</li> </ul>	Sistema operativo Windows
FLEXSIM	Eventos discretos y/o continuos	Procesos de manufactura, eliminación de residuos, manejo de materiales, almacenamiento, minería, logística, cadena de suministro, salud, aeroespacial.	<ul style="list-style-type: none"> <li>Interfaz gráfica 3D sobresaliente</li> <li>Importaciones de objetos desde software de diseño (AutoCAD, Solid Works, Catia, etc.)</li> <li>Análisis estadístico de rendimientos, cuellos de botella, utilización, etc.</li> </ul>	Sistema operativo Windows
ARENA	<ul style="list-style-type: none"> <li>Eventos discretos.</li> <li>Continuos</li> <li>Discretos-Continuos</li> </ul>	Cadena de suministros, procesos de manufactura, logística, distribución y almacenamiento y sistemas de servicio.	Ofrece simulación basada en diagramas de flujo para procesos de negocio. Animación que incorpora a AutoCAD, Visio y otros gráficos	Sistema operativo Windows

ProModel es un software de gran capacidad y flexibilidad para interactuar con los sistemas operativos Windows, que permite la interacción con otras herramientas computacionales como Excel, y su integración con Excel lo vuelve altamente amigable [5]. Considerado como uno de los más avanzados para la simulación de eventos discretos que permite la evaluación, planificación, diseño y control de la producción, actividades de almacenamiento, logística y demás relaciones operacionales y estratégicas. La ventaja que genera su uso se refleja en el ahorro económico de sistemas de planificación y control [7]. ProModel fue seleccionado a

causa de su disponibilidad en muchas universidades y en la industria [11]. Apoyado en mismo autor se enumeran las siguientes características:

- Desarrollado para sistemas de animación y simulación.
- Principalmente diseñado para modelar sistemas de manufactura.
- Ofrece simulación basada en diagramas de flujo para procesos de negocio.
- Ofrece tecnología LEAP, descrita abajo: Tecnología LEAP siglas en ingles de Locaciones, entidades y procesos de arribo. Donde los elementos de modelación que lo componen son partes o entidades, locaciones, recursos, redes de trayecto, logística de proceso y ruta, y arribos.
- Ofrece atributos, redes, recursos, macros y variables globales.
- Las corridas de simulación pueden ser trazadas sobre la pantalla al igual que las variables globales y el número de las entidades en locaciones individuales, lo que permite un entendimiento claro del sistema completo por el usuario, minimizando la naturaleza de caja negra de la simulación.

En la figura 1 se muestran pantallas de ProModel, una vista de programación de locaciones.

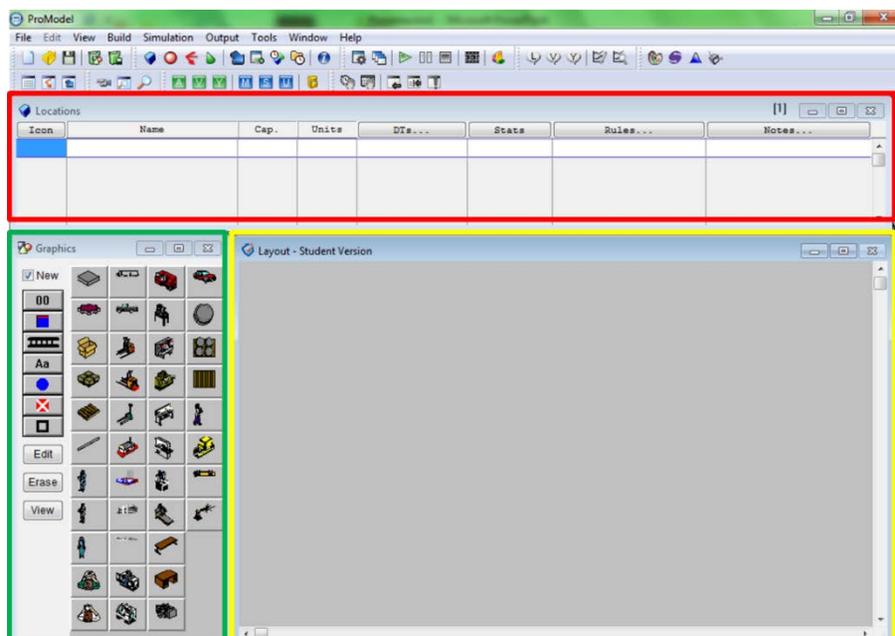


Figura 1 Simulación con ProModel.

## Estado del arte

Con respecto a estudios y/o trabajos relacionados con el análisis de sistemas productivos no balanceados se pueden mencionar los siguientes (figura 2).



Figura 2 Estado del arte.

Zhao [21] realizó un análisis de simulación para determinar el tamaño de lote de producción en un sistema multivariado y de lotes pequeños, se detectaron los excesos de existencias sustanciales y el procesamiento inactivo en la producción, por otra parte, los productos o materiales intermedios defectuosos se desechan en abundancia, lo que provoca un enorme impacto ambiental, los materiales inútiles y el procesamiento inactivo se reflejan en la generación de productos negativos que cuestan en términos de unidades monetarias, que son invisibles durante la producción, además, a través de varios escenarios de simulación, se obtienen dos análisis de sensibilidad para analizar los cambios en el costo negativo de los productos como resultado de la regulación del tamaño del lote de producción, esto cambia las tendencias y brinda conocimiento efectivo y estratégico o instrucciones para determinar, tamaño de lote de producción apropiada y para considerar beneficios tanto económicos como ambientales.

López-Nava [9] analizó la cadena de suministro de mezcal, encontraron escasa integración de los procesos productivos, la reducción de demanda de materia prima para la elaboración de mezcal provoca un desaprovechamiento en las plantas de agave, además la infraestructura para la producción de mezcal esta desaprovechada.

Murillo-Alvarado [12] identificó que es necesario desarrollar un marco de optimización adecuado para la gestión de la cadena de suministro en la industria

del tequila en México, considerando todas las actividades involucradas junto con los objetivos en conflicto de su operación diaria representa un desafío científico. Por lo tanto, propuso un enfoque de optimización de objetivos múltiples para diseñar una cadena de suministro de este tipo que explique la maximización simultánea del valor presente neto y el desempeño ambiental de la red.

Cantú-González [3] utilizó la herramienta de simulación para el análisis de los procesos productivos y como medio de experimentación de las variables involucradas, todo ello para el beneficio de mejorar el desempeño operacional. Su trabajo aporta diferentes aspectos de interés para la Ingeniería Industrial, presentó la fundamentación del concepto de simulación y su vinculación como herramienta del proceso, el análisis de las alternativas de software comercial existente y finalmente presenta un modelo de mejoramiento del desempeño operacional basado en la utilización del software de simulación ProModel.

Taylor [18] generó un sistema de gestión con simulación basada en la nube, para respaldar la toma de decisiones en la industria de elaboración de cerveza artesanal, el objetivo es ayudar a garantizar que sus productos se consuman en una ventana de tiempo óptima, además, el sistema pretende respaldar otros aspectos del proceso de elaboración de la cerveza, la simulación basada en la nube podría proporcionar acceso de bajo costo a diferentes escenarios sin tener que realizar cambios o inversiones considerables, esto sería utilizando un enfoque de plantilla basado en la plataforma.

Takahashi [17] aplicó simulación por computadora en un caso de estudio, para aumentar las ventas de la empresa, estas simulaciones por computadora traen a los interesados no solo las consecuencias de las intervenciones sino también las razones de las mismas, comenzó a usar el modelo de simulación como una caja de arena para probar sus nuevos escenarios potenciales, por lo tanto, las simulaciones de una dinámica de sistema no son solo medidas para mejorar la calidad del modelo, sino también el aprendizaje de los clientes, además, la compañía tiene la seguridad de qué tipo de información se recopilará sobre la base de modelos de simulación y resultados, esto realiza una toma de decisiones estratégica clara y segura.

## 2. Métodos

Hablar de un modelo de simulación implica entender que nos referimos a un punto de referencia a seguir en una perspectiva más simple de lo que el sistema original es en la realidad; y consecuentemente modelar sería el proceso a construir tal referencia, es decir tal modelo. En esta lógica debe desarrollarse el modelo de simulación que será la base de la experimentación, el análisis y finalmente los resultados que harán del sistema analizado, una buena opción para mejorarlo. En las siguientes secciones se describen detalladamente cada una de las etapas del método de investigación para éste trabajo (figura 3).

Es importante aclarar que, si durante el desarrollo de la investigación surgen necesidades de cambio debido al desarrollo de la misma, estas serán realizadas en relación al correcto desarrollo de la investigación.

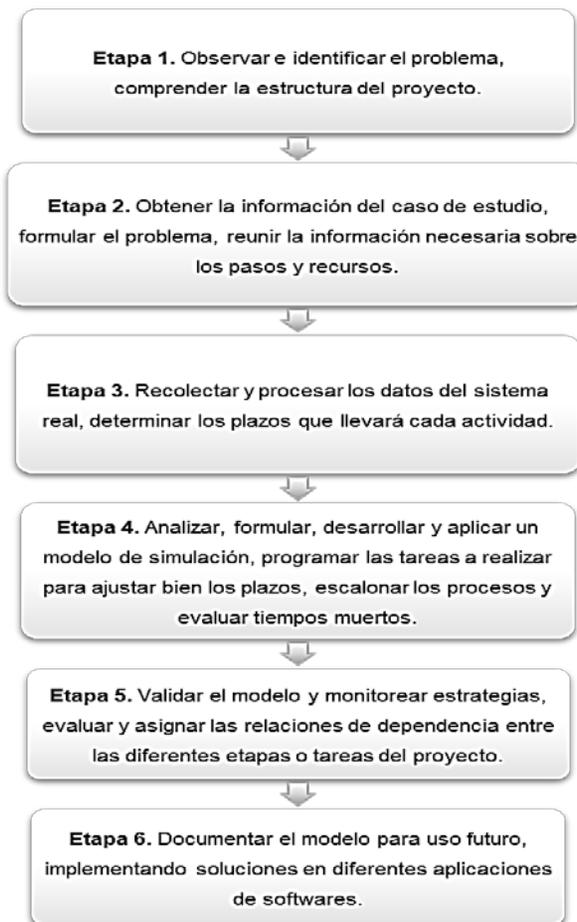


Figura 3 Diagrama del método de investigación.

### **Etapa 1. Observar e identificar el problema**

En esta etapa se realizó el análisis de la información para diagnosticar el estado actual del funcionamiento del sistema de producción de mezcal; así mismo, se desarrolló una estrategia táctica de implementación para el análisis de productividad. Un cierto sistema genérico de producción que cuenta con diez etapas en su proceso, requiere ser utilizado con propósitos de entrenamiento y a la vez se pretende evaluar sus límites de capacidad en la producción de mezcal ante el análisis de diferentes escenarios.

### **Etapa 2. Obtener la información del caso de estudio, formular el problema**

Se realizó el análisis del sistema, incluyendo el mapeo del sistema de producción para ilustrar las complejidades. Esta actividad contribuye a la identificación de fuentes de ventajas competitivas para la aplicación de administración de operaciones que nos permite comprender las oportunidades y limitaciones. Analizando el proceso se aprecian algunos tiempos muertos y cuellos de botella en la operación, lo que representa desbalanceo entre etapas; por tal motivo es necesario efectuar un completo análisis para buscar la estandarización y así la reducción del desperdicio antes mencionado.

### **Etapa 3. Recolectar y procesar los datos del sistema real**

La línea de producción registro llegadas a la bodega de materia prima (en lo sucesivo "agave"), es recibida y se pasa al área de reducción de tamaño (corte manual) para ser partida en dos o más, después es transportada hacia el patio que corresponde a un almacén temporal del mismo. El agave sale del inventario de la bodega de materia prima para unirse en el proceso.

Las entradas a producción son a razón de pequeños lotes debido a la capacidad del horno, aquí permanecen durante 11 horas. Una vez que termina la operación de cocción, el agave cocido pasa a través de una desgarradora con duración de 2 horas, con el objetivo de disminuir su tamaño, es decir de aquí se obtiene el agave en forma de fibra (todavía no hay extracción de jugo). El agave anteriormente mencionado es pasado a través de un molino de masa de rodillos de fierro durante

4 horas, exprimiendo todo el jugo que contiene el agave. Una vez extraído el jugo, la fibra residual es conocida con el nombre de bagazo, el cual ya no tiene ninguna utilidad en la elaboración de Mezcal. El jugo es colectado en las tinas de preparación de mostos, aquí se agrega la levadura (microorganismo responsable del proceso de fermentación) y agua, una vez preparados, el mosto es bombeado al tanque de fermentación, donde permanecen aproximadamente por 72 horas.

Una vez terminada la fermentación, la mitad del mosto es cargado en la torre de destilación, la carga restante queda en espera de que concluya la primera destilación de 6 horas, como productos de las destilaciones se obtienen "Puntas", "Mezcal Joven" con graduación alcohólica de 55% en volumen y "Colas", las tres fracciones son colectadas en diferentes tanques. El Mezcal Joven obtenido en la es bombeado el área de almacenes.

#### **Etapa 4. Analizar, formular, desarrollar y aplicar un modelo de simulación**

El análisis del sistema permite identificar los factores involucrados en la planificación, esto implica una gran cantidad de variables: pronósticos, inventarios, costos, rendimientos, etcétera. En esta etapa se aplica un modelo para reducir la incertidumbre, debido a que estas variables generan una aleatoriedad de los suministros principales. En consideración de los elementos del sistema original real se desarrolló un modelo utilizando ProModel. Entre los elementos que dieron lugar a su elaboración se incluye la programación de locaciones, definición de entidades, llegadas de materia prima, rutas y procesos. Se verificó que cada elemento del sistema de producción fuera reproducido en el modelo. La estructura inicial se muestra en la figura 4.

#### **Etapa 5. Validar el modelo y monitorear estrategias**

Para llevar a cabo esta etapa fue necesario efectuar una comparación entre el modelo generado y las condiciones conocidas del sistema real original. Esto propició análisis de varias corridas, donde se observó que los resultados se deben evaluar para definir qué criterios considerar para efectuar una validación correcta y así obtener resultados altamente semejantes después de la comparación.

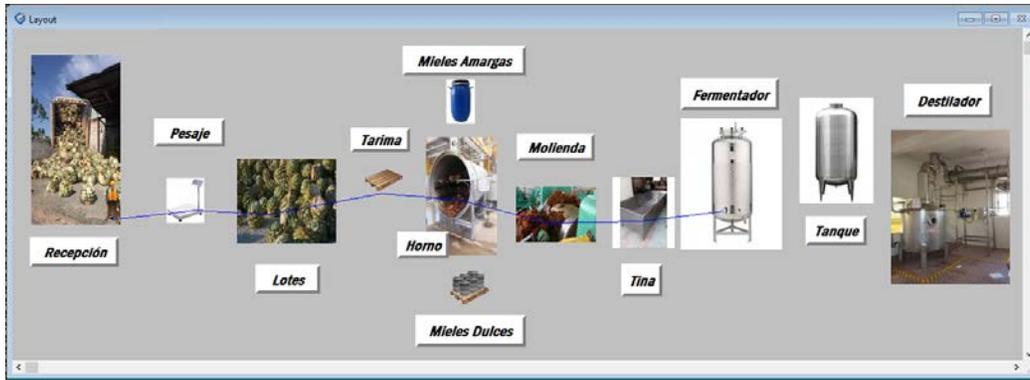


Figura 4 Layout inicial del proceso de producción de mezcal.

La evaluación incluyó la participación del personal conocedor del proceso, pero neutral a la validación para apoyar el elemento de imparcialidad del ejercicio. Esta etapa servirá para realizar el desarrollo de una estrategia táctica para la implementación de administración de operaciones en la producción de mezcal. Las estrategias o soluciones deben ser entendidas como modelos de negocio capaces de subsistir al finalizar los proyectos o intervenciones.

### **Etaapa 6. Documentar modelo como uso futuro para implementar soluciones**

El desarrollo de este artículo y el inicio de la continuación del mismo han sido efectuados con el propósito de documentar el ejercicio de simulación, garantizando una estructura para futuros usos. En ejercicios realizados en la industria se recomienda integrar la documentación del modelo al sistema de calidad para hacerlo auditable y respetable. El desarrollo del análisis de productividad en los sistemas no balanceados es un proceso continuo que nunca termina. Un buen sistema de validación, monitoreo y medición de los resultados puede ayudar a medir el éxito de las intervenciones implementadas y proporcionar información sobre qué más queda por hacer.

### **3. Resultados**

Como primer punto a revisar, se generó un Diagrama de Gantt con apoyo de una hoja de cálculo. A pesar de sus limitaciones, las herramientas de los diagramas de barras permitieron identificar su practicidad y utilidad en la planificación y

programación de operaciones, es por ello que su uso es bastante generalizado, aunque no explotado en su verdadera dimensión (figura 5).

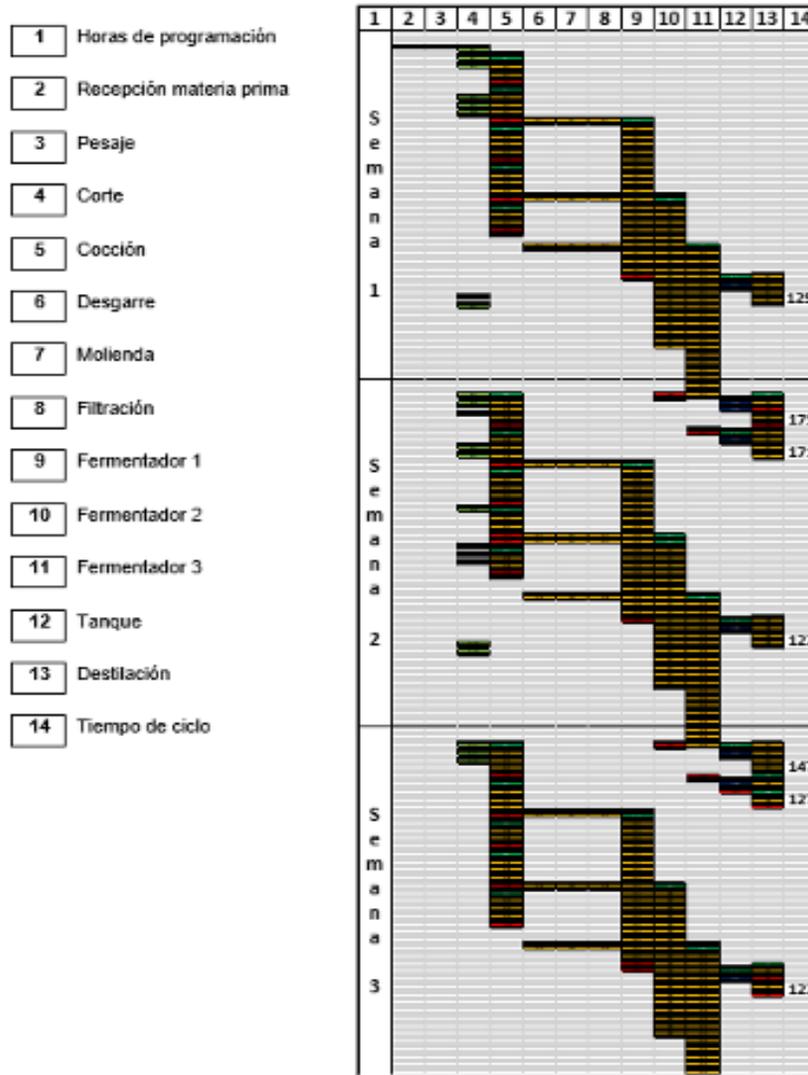


Figura 5 Representación de la planificación mediante un Diagrama de Gantt.

La planificación y programación de actividades es una actividad necesaria para encauzar un éxito futuro en las operaciones de una organización, no cuenta con un algoritmo generalizado, más bien su análisis y planteamiento de una solución, se hace en base a la teoría de “ensayo y error” con una base heurística. No tendría sentido si no se retroalimenta con el control y monitoreo; en este entendido, el diagrama elaborado permitió ser utilizado tanto como mecanismo de antelación, así

como mecanismo evaluativo después del hecho. Mediante la programación manual se identificó un cuello de botella en el proceso de producción de mezcal.

La metodología utilizada en este artículo permitió analizar el comportamiento y desempeño real del sistema, de un proceso que se lleva a cabo en una planta productora de mezcal, por medio del ProModel que permite la modelación y análisis para la mejora de procesos. Este tipo de metodología puede extenderse para la evaluación de otros sistemas, sin embargo, la mayor dificultad para modelar se centra en comprender el sistema actual.

La simulación del modelo permitió construir una metodología para el análisis del proceso con el fin de maximizar el uso de los recursos, dado que la experimentación sobre el modelo ayuda a comprender el comportamiento del sistema y a la toma de decisiones, las cuales pueden aumentar la productividad con un mejor desempeño del sistema [16].

Considerando un comportamiento general, los resultados observados se describen en las siguientes líneas; se planteó un escenario ideal con una operación en planta de 24 horas diarias y se obtuvo un dato promedio del tiempo de ciclo de cada corrida de 132 horas, los resultados mostrados en la figura 6 se estimaron en forma cuantitativa. Para obtener estos datos fue necesario evaluar 24 corridas, equivalentes a 1383 horas de proceso continuo.

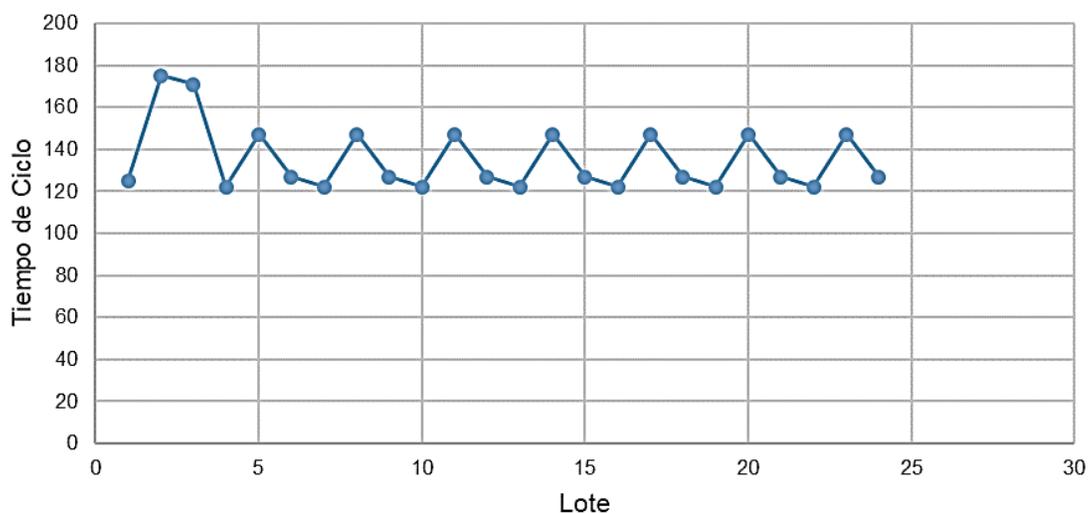


Figura 6 Tiempo de ciclo en el proceso de producción de mezcal.

Durante la ejecución del modelo de simulación, el programa ProModel, guardó valores numéricos relacionados con locaciones y entidades. Para las locaciones se pueden mostrar valores como capacidad, contenido promedio, contenido máximo, porcentaje de utilización, porcentaje vacía, porcentaje ocupada, etc. Orientados a analizar la capacidad de la locación con respecto de su utilización. Hablando de las entidades, se pueden consultar valores como porcentaje del tiempo en que una entidad se encuentra en procesamiento, en movimiento, bloqueada, o en espera, de tal modo que se pueda analizar qué proceso representa un cuello de botella o donde hay que hacer cambios de capacidad o lógica de asignación.

La utilización de las etapas de la simulación como definición del sistema, formulación del modelo, identificación de variables, recolección de datos, implementación e interpretación, permiten una mayor comprensión de la realidad del sistema que se está simulando. Con el fin de poder comparar el desempeño del modelo, se usó el reporte general de salida de ProModel. El listado completo de los resultados se puede consultar a continuación en la figura 7.

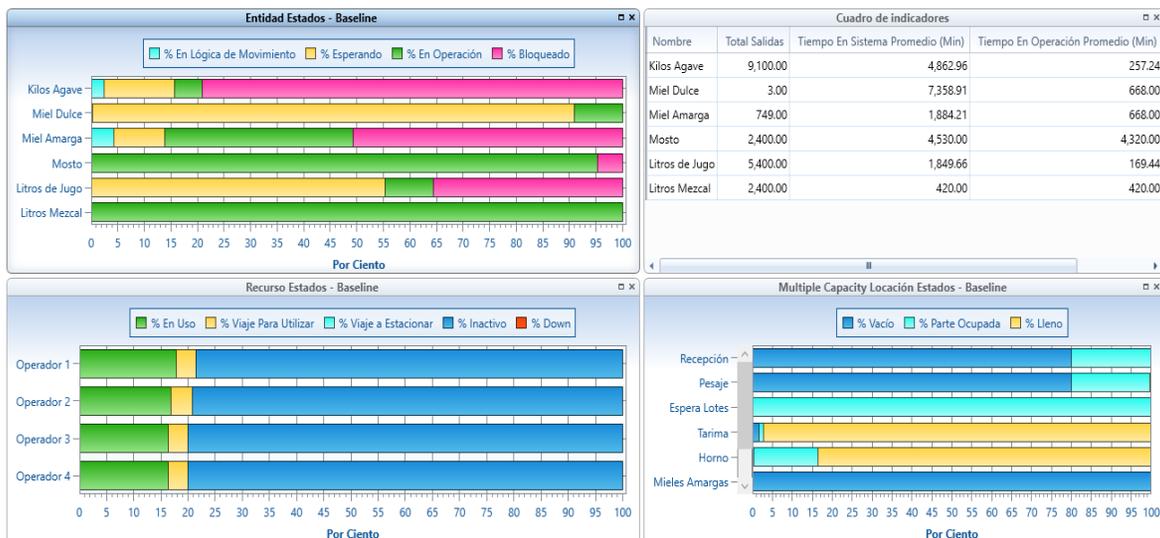


Figura 7 Reporte general del visor de salida de ProModel.

Se puede observar que el reporte muestra la producción de mezcal de acuerdo a los kilos procesados de agave, una parte de la información de interés que genera el software ProModel de este análisis corresponde a los datos en la tabla 2.

Tabla 2 Resumen Locación en el visor de salida de ProModel.

Locación Resumen								
Nombre	Tiempo Programado (Hr)	Capacidad	Total Entradas	Tiempo Por entrada Promedio (Min)	Contenido Promedio	Contenido Máximo	Contenido Actual	% Utilización
Recepción	1,383.00	100,000.00	25,002.00	11,148.77	3,359.14	25,002.00	0.00	3.36
Pesaje	1,383.00	54.00	25,002.00	24.01	7.23	54.00	0.00	13.39
Espera Lotes	1,383.00	25,000.00	25,002.00	54,555.41	16,437.63	19,402.00	19,402.00	65.75
Tarima	1,383.00	700.00	5,600.00	10,150.25	685.00	700.00	700.00	97.86
Horno	1,383.00	700.00	5,280.00	10,846.97	690.19	700.00	700.00	98.60
Mieles Amargas	1,383.00	50.00	749.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00
Mieles Dulces	1,383.00	100.00	103.00	78,922.95	97.96	100.00	100.00	97.96
Molienda	1,383.00	700.00	3,728.00	5,265.28	236.55	700.00	228.00	33.79
Tina	1,383.00	2,000.00	3,500.00	12,726.38	536.78	2,000.00	500.00	26.84
Fermentador	1,383.00	1,200.00	3,000.00	17,797.81	643.45	1,200.00	600.00	53.62
Tanque	1,383.00	600.00	2,400.00	210.00	6.07	600.00	0.00	1.01
Destilador	1,383.00	600.00	2,400.00	420.00	12.15	600.00	0.00	2.02

Se espera que al aumentar el número de entidades (agave) que entran a la planta, también aumenta el número de productos terminados y la utilización de los equipos, pero en realidad, ¿Cuál es la magnitud de estos incrementos?, mediante este modelo de simulación establecido, se pudo observar el comportamiento de estos valores. La figura 8, muestra una comparación de las locaciones después de simular el sistema sin permitir que durante el ciclo total de la corrida se tenga un faltante de abastecimiento de lotes, los cuales alimentan con entidades “agave” al área de producción de mezcal.

Se observó que en la mayoría de los equipos bajó el nivel de producción, considerando que los equipos no se pararon por falta de producto sino todo lo contrario, debido a que se tenía flujo de materia prima constante los equipos con mayor tiempo de procesamiento o los de menor capacidad, fueron los que determinaron el ritmo de toda la cadena o línea de producción (cuello de botella), es decir, el eslabón más débil marcó el ritmo del sistema, lo que ocasionó que muchos equipos detrás de este eslabón se bloquearan y los equipos delante se mantuvieron ociosos. Un ejemplo claro de lo anterior se muestra en la figura 9, donde la capacidad de los equipos es la limitante en el tiempo simulado, debido a que es imposible enviar producto a las siguientes etapas, es por ello que ProModel, arroja un mensaje con la leyenda “NOTA: Hubo arribos fallidos de entidad debido a falta de capacidad”.



a) Corrida con número de entidades fijas (entrada de agave).



b) Corrida aumentando el número de entidades (entrada de agave).

Figura 8 Comparación del modelo considerando el abastecimiento de agave.

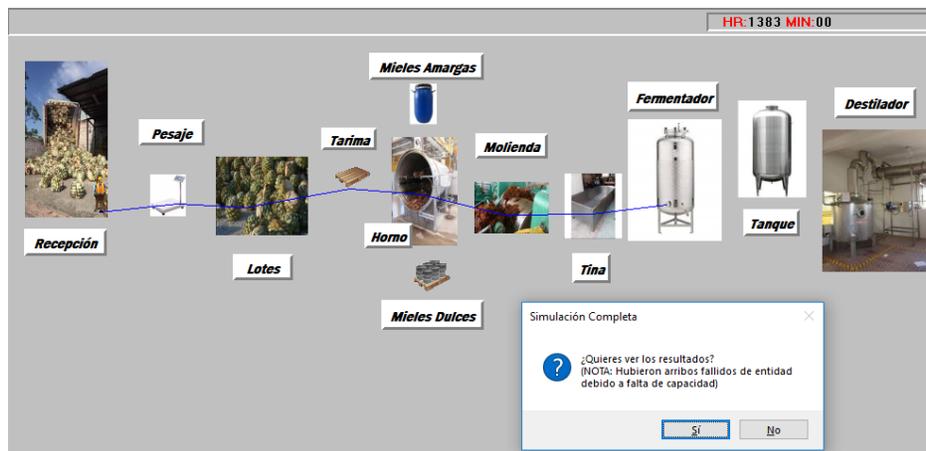


Figura 9 Corrida con aumento de la producción (arribos fallidos).

## **4. Discusión**

El presente artículo logra representar el sistema real por medio de un modelo de simulación discreta.

Se enfatizó a lo largo de este trabajo la importancia de seguir el enfoque sistémico en conjunto con la simulación de sistemas por computadora. Uno de los objetivos principales fue el diseño, prueba y aplicación de un modelo de simulación para las operaciones de fabricación de una empresa productora de mezcal. Presentamos aquí solamente un resumen del modelo ante la imposibilidad de describir el mismo en su totalidad debido a su complejidad.

El modelo obtenido sirve para realizar análisis sin grandes complicaciones matemáticas o requerimientos especiales de cómputo; mediante este modelo de simulación se observó que es posible realizar una estimación en forma cuantitativa los efectos o impactos esperados de cambios en la operación de la planta, además es posible evaluar el rendimiento de la actividad productiva. Incluso se pueden evaluar mejoras potenciales en su operación (determinación de la presencia de cuellos de botella). Los resultados del análisis sugieren que la empresa tiene poco margen para incrementar sus operaciones industriales dentro de su espacio local. Aunque todavía se puede aumentar el número de operaciones diarias, el modelo de simulación estima que pronto se tendría un deterioro significativo en el nivel de operación de la empresa, lo cual incrementaría los riesgos de productos faltantes por falta de capacidad. Por otro lado, los resultados de las simulaciones indican que un pequeño aumento en la capacidad de algunos equipos, se traduciría en un aumento importante en el tamaño promedio de unidades producidas, en un mayor desempeño de los equipos y también en la disminución de notables problemas de saturación. Tal como se observa, el análisis de un sistema complejo puede ser modelado mediante la fragmentación del sistema, el software adecuado y los datos indicados.

Como hemos visto, a lo largo de este documento, el uso conjunto de la ingeniería de sistemas, el modelado y la simulación, son una herramienta poderosa sin lugar a duda de gran aprovechamiento y una opción exitosa al evaluar el rendimiento de la actividad industrial para el desempeño operacional. Gracias a la simulación es

posible tomar decisiones sobre probables cambios a efectuar en los procesos sin tener que generar cambios físicos que puedan entorpecer las operaciones.

Por último, se espera que este trabajo refleje la importancia de la simulación tanto para alumnos, profesores, investigadores y empresarios hacia el involucramiento en la modelación y análisis de sistemas realistas con un mayor grado de complejidad. En este artículo se puntualizó el uso de la herramienta ProModel como apoyo para la construcción de un modelo de simulación. Sin embargo, debido que los sistemas reales son muchos y variados, se invita al lector interesado en esta disciplina a explorar los softwares disponibles (como FlexSim, DELMIA, etc.).

Para futuros trabajos se recomienda efectuar ejercicios complejos de simulación donde puedan ponerse en prueba variables críticas de la operación, también dar continuidad al presente trabajo para el beneficio de agregar elementos de justificación sobre el uso de la herramienta de simulación.

## **5. Revisores, recepción y aceptación de artículo**

**Recepción artículo:** 20/mayo/2019      **Aceptación artículo:** 27/junio/2019

### **Revisor 1:**

Nombre: Georgina Rico Ojeda  
Institución: Tecnológico Nacional de México / CRODE Celaya  
Cédula Profesional: 5316009  
Área de conocimiento: Gestión de proyectos de innovación y desarrollo tecnológico  
Correo electrónico:

### **Revisor 2:**

Nombre: Wuendy Cándido Cíntora Mejía  
Institución: Tecnológico Nacional de México en Celaya  
Cédula Profesional: 5056438  
Área de conocimiento: Biotecnología  
Correo electrónico: ccintoram@gmail.com

## **6. Bibliografía y Referencias**

- [1] Banks, J., Carson, I. I., Nelson, B. L., & Nicol, D. M. (2005). Discrete-event system simulation. Pearson.

- [2] Calderón, J. L., & Lario, F. C. (2007). Simulación de cadenas de suministro: Nuevas aplicaciones y áreas de desarrollo. *Información tecnológica*, 18 (1), 137-146.
- [3] Cantú-González, J. R., García, M. D. C. G., & Herrera, J. L. B. (2016). Simulación de procesos, una perspectiva en pro del desempeño operacional. *Revista Iberoamericana de Producción Académica y Gestión Educativa*, 3 (5).
- [4] Carson J.S.I.I. (2003). Introduction to modelling and simulation. *Winter simulation conference*, 1, 7-13.
- [5] Contreras M.J., Bastleri F. and Maldonado L. (2010). Optimization of the harbor operations using simulation and surface response methodology. *Revista ingeniería industrial*, 9 (2), 73-92.
- [6] Higgins, A., Beashel, G., & Harrison, A. (2006). Scheduling of brand production and shipping within a sugar supply chain. *Journal of the Operational Research Society*, 57 (5), 490-498.
- [7] Guerrero Hernández, M. A., & Henriques Librantz, A. F. (2014). Simulación de eventos discretos de la cadena logística de exportación de commodities. *Ingeniare. Revista chilena de ingeniería*, 22 (2), 257-262.
- [8] Law M.A. (2006). How to build valid and credible simulation models. *Proceedings of the 38th winter simulation conference*, 38, 58-66.
- [9] López-Nava, G., Martínez Flores, J. L., Cavazos Arroyo, J., & Mayett Moreno, Y. (2014). La cadena de suministro del mezcal del Estado de Zacatecas. Situación actual y perspectivas de desarrollo. *Contaduría y administración*, 59 (2), 227-252.
- [10] Marmolejo, I. S., & Marín, J. M. (2013). PROMODEL: una herramienta al evaluar el rendimiento de la actividad industrial. *Iberoamerican Journal of Industrial Engineering*, 5 (10), 232-250.
- [11] Möller D. P. (2014). Introduction to transportation analysis, modeling and simulation. *Computational foundations and multimodal applications*. London: Springer-Verlag.

- [12] Murillo Alvarado, P. E., Guillén Gosálbez, G., Ponce Ortega, J. M., Castro Montoya, A. J., Serna González, M., & Jiménez, L. (2015). Multi-objective optimization of the supply chain of biofuels from residues of the Tequila industry in Mexico. *Journal of Cleaner Production*, 108, 422-441. Doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.08.052>
- [13] Price R. N. y Harrell Ch. R. (1999). Simulation modeling and optimization using ProModel. *Proceedings of the winter simulation conference*.
- [14] Rubio, E. M., Sebastián, M. A., & Sanz, A. (2004). Simulación de sistemas flexibles de fabricación mediante modelos de realidad virtual. *Información tecnológica*, 15 (1), 49-54.
- [15] Shannon, R. E. (1998). Introduction to the art and science of simulation. *Winter Simulation Conference. Proceedings*, 1, 7-14.
- [16] Soto, J. (2010). *Laboratorios de simulación discreta*. Colombia: Postergraph SA.
- [17] Takahashi, Y., & Tanaka, N. (2017). Searching leverage point to increase sales of a vertically integrated black tea company. *Winter simulation conference*.
- [18] Taylor, S. J., Anagnostou, A., Bell, D., Kite, S., & Pattison, G. (2017). Craftbrew: Experiences of developing a low-cost brewery management system with cloud-based simulation. *Winter Simulation Conference*.
- [19] Vélez Gallego, M. C., Valencia Ramírez, D. A., & Castro Zuluaga, C. A. (2012). Heurístico de simulación-optimización para la configuración de un sistema de estantería selectiva simple. *Ingeniare. Revista chilena de ingeniería*, 20 (1), 17-24.
- [20] Yalcinkaya, Ö. & Bayhan, G. M. (2009). Modelling and optimization of average travel time for a metro line by simulation and response surface methodology. *European Journal of Operational Research*, 196 (1), 225-233.
- [21] Zhao, R., Ichimura, H., & Takakuwa, S. (2013). MFCA-Based simulation analysis for production lot-size determination in a multivariety and Small-batch production system. *Winter Simulation Conference*.