



**TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO**  
en Celaya



**TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO EN CELAYA**  
**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA INDUSTRIAL**

**“ANÁLISIS DE PRODUCTIVIDAD EN SISTEMAS  
NO BALANCEADOS: APLICACIÓN A LA  
PRODUCCIÓN DE MEZCAL”**

**TESIS PROFESIONAL  
PARA OBTENER EL GRADO DE:**

**MAESTRO EN INGENIERÍA INDUSTRIAL**

**PRESENTA:  
ING. LUIS ENRIQUE SANDOVAL ORTEGA**

**DIRECTOR DE TESIS:  
DR. SALVADOR HERNÁNDEZ GONZÁLEZ**

**CO-DIRECTOR DE TESIS:  
DR. JOSÉ ENRIQUE BOTELLO ÁLVAREZ**

**CELAYA, GTO., MÉXICO, FEBRERO, 2020**



"2019, Año del Caudillo del Sur, Emiliano Zapata"

**Asunto: Autorización de impresión de trabajo profesional.**

Celaya Gto., **05 Febrero 2020**

**M.C. MOISES TAPIA ESQUIVIAS**  
**JEFE DEL DEPARTAMENTO DE INGENIERIA INDUSTRIAL.**  
**Presente.**

*De acuerdo a la convocatoria hecha por esta jefatura a fin de aprobar o no la impresión del trabajo profesional titulado:*

**"ANÁLISIS DE PRODUCTIVIDAD EN SISTEMAS NO BALANCEADOS: APLICACIÓN A LA PRODUCCIÓN DE MEZCAL"**

*Presentado por el (a) pasante **C. ING. Luis Enrique Sandoval Ortega (M1803012)** alumno (a) del programa de Maestría en Ingeniería Industrial que ofrece nuestro Instituto. Hacemos de su conocimiento que éste jurado ha tenido a bien aprobar la impresión de dicho trabajo para los efectos consiguientes.*

**ATENTAMENTE**

**DR. SALVADOR HERNANDEZ GONZALEZ**  
Presidente

**M.C. VICENTE FIGUEROA FERNANDEZ**  
Secretario

**DR. JOSÉ ANTONIO VÁZQUEZ LOPEZ**  
Vocal



TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO  
en Celaya

**M.C. MANUEL DARIO HERNANDEZ RIPALDA**  
Vocal Suplente

**COORDINACION DE MAESTRÍA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL**

Ccp. Escolares  
Archivo.  
VFF\*MTE\*dmvp



# Agradecimientos

*Primeramente, doy gracias a Dios por permitirme tener tan buena experiencia dentro del Instituto, ya que gracias a él he logrado dar un paso más en mi desarrollo personal y por haberme permitido formarme en el ámbito profesional para continuar en lo que tanto me apasiona.*

*Gracias a cada profesor del Departamento de Posgrado de Ingeniería Industrial del Tecnológico Nacional de México en Celaya que hicieron parte de este proceso integral de formación, los cuales me impartieron el conocimiento necesario; que deja como producto terminado esta tesis, que permanecerá dentro de los conocimientos y desarrollo de las demás generaciones que están por llegar.*

*De manera especial deseo expresar mi más sincero agradecimiento al Dr. Salvador Hernández González y al Dr. José Enrique Botello Álvarez, quienes fungieron como mi asesor y coasesor respectivamente. Gracias maestros por todo lo compartido y por guiarme en cada momento.*

*Agradezco al M.C. Vicente Figueroa Fernández y de igual forma al Dr. José Antonio Vázquez López por ser revisores de este trabajo.*

*Al Concejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), que con el apoyo otorgado contribuyo a la realización de la presente investigación.*

*Es importante mencionar lo siguiente, podemos ayudar y guiar a muchas personas si ellas lo permiten, pero también podemos ser ayudados y guiados durante nuestra vida; por esto mismo, mediante estos agradecimientos de tesis, quiero exaltar la labor de todos mis amigos y compañeros, todos aquellos que estuvieron presentes durante toda o la mayor parte de la realización y el desarrollo de esta tesis, gracias a aquellos que con respeto y decencia realizaron aportes a está, gracias a todos.*

*Luis Sandoval*

# Dedicatorias

*Es mi deseo como sencillo gesto de agradecimiento, dedicarle este trabajo de grado plasmado en el presente informe, a mi esposa Paulina por su sacrificio y esfuerzo, aunque hemos pasado momentos difíciles siempre ha estado brindándome su comprensión, cariño y amor para realizarme profesionalmente.*

*A mis queridos hijos Dulce y Matías por ser fuente de motivación e inspiración para poder superarme cada día más y así poder luchar para que la vida nos depare un futuro mejor.*

*A mi amada Madre y Hermana quienes con sus palabras de aliento no me dejaban decaer para que siguiera adelante y siempre sea perseverante y cumpla con mis ideales.*

*A mis Hermanos, Familiares y a todas aquellas personas que de una u otra manera me apoyaron permanentemente con su espíritu alentador y que han contribuido de forma incondicional para el logro de mis metas y objetivos propuestos.*

*No porque sea la menos importante, la última persona que quiero mencionar me ha mostrado el camino en el ámbito profesional, mediante sus enseñanzas, experiencias y muchas otras cosas que sería complicado enumerarlas; sobre todo Cándido, por tu amistad incondicional.*

***!!!Infinitas gracias por todo!!!***

*Luis Sandoval*



## Resumen

La función principal del sistema de producción consiste en la transformación de materiales en productos que sean aptos para su consumo y que satisfagan las necesidades de la demanda. Se encarga de combinar los factores de producción con el fin de que el resultado obtenido sea el mejor posible. Para que se pueda reducir este grado de incertidumbre como resultado del cambio constante del entorno, se deben respaldar sus decisiones en algo más que la intuición, deben respaldarlo en la elaboración de pronósticos correctos y precisos que sean suficientes para satisfacer las necesidades de planeación de la organización. Por lo tanto, se aplicarán las diferentes técnicas y herramientas de la administración de operaciones en el proceso de producción de mezcal.

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 mediante el software ProModel para analizar sistemas de producción no balanceados en la industria de bebidas alcohólicas. 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 pequeño aumento en la capacidad de algunos equipos, se traduciría en un mayor desempeño del sistema.

**Palabras Clave:** mezcal, modelo, simulación, ProModel, sistemas de producción no balanceados.



## Abstract

The main function of the production system is the transformation of materials into products that are suitable for consumption and that meet the needs of the demand. It is responsible for combining the factors of production in order that the result obtained is the best possible. So that this degree of uncertainty can be reduced as a result of the constant change of the environment, its decisions must be supported in something more than intuition, must support it in the elaboration of correct and precise forecasts that are sufficient to satisfy the planning needs of the organization. Therefore, the different techniques and tools of operations management will be applied in the Mezcal production process.

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 in the alcoholic beverage industry. 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 a small increase in the capacity of some equipment, would result in a higher performance of the system.



## ÍNDICE

Agradecimientos.....	iii
Dedicatorias .....	iv
Resumen.....	v
Abstract.....	vi
CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN.....	1
1.1. Contexto.....	1
1.2. Objetivos .....	2
1.2.1. Objetivo General.....	2
1.2.2. Objetivos específicos.....	2
1.3. Justificación.....	3
1.4. Preguntas de investigación .....	3
1.5. Alcance y delimitaciones .....	4
1.6. Hipótesis .....	4
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO.....	5
2.1. Administración de los sistemas de producción y las operaciones.....	5
2.1.1. Noción, concepto y alcance de la investigación de operaciones (IO).....	5
2.1.2. Pronósticos .....	7
2.1.3. Tipos de pronósticos.....	8
2.1.4. Componentes de la demanda.....	10
2.2. El diseño de experimentos hoy .....	11
2.3. Principios básicos del diseño de experimentos .....	12
2.3.1. Aleatorización .....	13



2.3.2.	Repetición.....	13
2.3.3.	Control de error experimental .....	13
2.4.	Diseño de experimentos en la investigación .....	15
2.5.	Definiciones básicas en el diseño de experimentos .....	16
2.5.1.	Variables, factores y niveles .....	17
2.6.	Diseño Factorial .....	20
2.7.	Análisis de varianza (ANOVA) .....	22
2.8.	Métodos asociativos de pronóstico: análisis de regresión y correlación .....	24
2.8.1.	Uso del análisis de regresión para pronosticar .....	24
2.8.2.	Error estándar de la estimación .....	25
2.8.3.	Coeficientes de correlación para rectas de regresión .....	25
2.9.	Gráficas de Gantt .....	27
2.10.	Teoría de restricciones.....	29
2.10.1.	Cuello de botella y recursos restringidos por la capacidad.....	30
2.10.2.	Tambor, amortiguador, soga .....	32
2.11.	Ley de Little.....	35
2.11.1.	Ley de Little en la Administración de Operaciones (AO) .....	37
2.11.2.	La Administración de Operaciones tiene una orientación diferente de la Teoría de Colas.....	40
2.12.	Manufactura Esbelta .....	41
2.12.1.	Los siete desperdicios .....	43
2.12.2.	Herramientas y técnicas en la Manufactura Esbelta .....	45
2.13.	Definición de simulación .....	46
2.13.1.	Simulación como herramienta de ingeniería .....	47
2.13.2.	Mejoramiento de procesos .....	49





2.15. Estado del arte.....	50
<b>CAPÍTULO III: METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN .....</b>	<b>53</b>
3.1. Descripción del método de investigación .....	53
3.1.1. Etapa 1. Observar e identificar el problema.....	55
3.1.2. Etapa 2. Obtener la información del caso de estudio .....	55
3.1.3. Etapa 2. Recolectar y procesar los datos del sistema real .....	55
3.1.4. Etapa 4. Analizar las variables, formular, desarrollar y aplicar un modelo de simulación .....	56
3.1.5. Etapa 5. Validar el modelo y monitorear estrategias .....	57
3.1.6. Etapa 6. Documentar el modelo como uso futuro.....	57
<b>CAPÍTULO IV: RESULTADOS Y CONCLUSIONES.....</b>	<b>58</b>
4.1. Resultados del método de investigación.....	58
4.1.1. Resultados de la definición del problema y los requerimientos .....	59
4.1.2. Resultados del diseño del modelo conceptual.....	61
4.1.3. Resultados de la obtención y análisis estadístico de datos .....	64
4.1.4. Resultados del modelo actual del proceso de producción de mezcal....	67
4.1.5. Resultados de la verificación y validación del modelo de simulación ....	72
4.1. Conclusiones.....	82
<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>84</b>
Anexo 1: Carátula de publicación de artículo .....	92
Anexo 2: Estancia en la Planta Productora de Mezcal .....	94



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Relación de los cinco elementos de la IO con el mundo real e ideal.....	6
Figura 2.2. Demanda histórica de productos que consiste en una tendencia al crecimiento y una demanda temporal .....	10
Figura 2.3. Proceso interactivo de la experimentación .....	15
Figura 2.4. Variables de un proceso y preguntas a responder al diseñar un experimento .....	17
Figura 2.5. Factores y variables en la producción de mezcal.....	20
Figura 2.6. Cuatro valores del coeficiente de correlación.....	26
Figura 2.7. Gráfica de Gantt para programar los trabajos A, B y C .....	28
Figura 2.8. Flujo lineal de un producto con cuello de botella.....	33
Figura 2.9. Flujo lineal de productos con un recurso restringido por la capacidad ....	35
Figura 2.10. Marco genérico para la Ley de Little .....	36
Figura 2.11. Ley de Little aplicada a la teoría de colas .....	37
Figura 2.12. Ejemplo de comportamiento de un inventario .....	39
Figura 2.13. Filosofía Manufactura Esbelta.....	42
Figura 2.14. Estado del arte .....	50
Figura 3.1. Diagrama del método de investigación .....	54
Figura 4.1. Diagrama del proceso de fabricación del mezcal.....	59
Figura 4.2. Representación de la planificación mediante un Diagrama de Gantt.....	62
Figura 4.3. Tiempo de ciclo en el proceso de producción mezcal .....	63
Figura 4.4. Análisis de datos .....	66
Figura 4.5. Diseño del modelo.....	67
Figura 4.6. Reporte General del visor de salida de ProModel .....	68
Figura 4.7. Corrida con número de entidades fijas (entrada de agave).....	70
Figura 4.8. Corrida aumentando el número de entidades (entrada de agave) .....	70
Figura 4.9. Corrida con aumento de la producción (arribos fallidos) .....	71



Figura 4.10. Identificación de efectos importantes del DOE: Regresión Factorial..... 73  
Figura 4.11. Gráfica de efectos ..... 74  
Figura 4.12. Gráficas de residuos para mezcal ..... 81

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Técnicas de pronósticos y modelos comunes ..... 9  
Tabla 2.2. Puntos de diseño o tratamientos ..... 19  
Tabla 2.3. Anova para un sistema de medición con dos factores ..... 23  
Tabla 2.4. Resumen de notación..... 38

Tabla 4.1. Diagrama de flujo del proceso de elaboración de mezcal ..... 60  
Tabla 4.2. Análisis estadístico descriptivo de los datos recolectados..... 64  
Tabla 4.3. Resumen Locación en el visor de salida de ProModel ..... 69  
Tabla 4.4. Datos obtenidos del modelo de simulación ..... 76  
Tabla 4.5. Análisis de varianza del diseño de experimentos ..... 77  
Tabla 4.6. Resultados clave: S, R-cuad., R-cuad.(ajustado), R-cuad.(pred)..... 78  
Tabla 4.7. Coeficientes del modelo ..... 79  
Tabla 4.8. Resultados de nuevas observaciones mediante la ecuación de regresión 80



## ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 2.1.....	14
Ecuación 2.2.....	24
Ecuación 2.3.....	25
Ecuación 2.4.....	26
Ecuación 2.5.....	36
Ecuación 2.6.....	39
Ecuación 2.7.....	39
Ecuación 4.1.....	65
Ecuación 4.2.....	65
Ecuación 4.3.....	66
Ecuación 4.4.....	80



## CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN

### 1.1. Contexto

Analizar es una acción que permite poner en práctica los procedimientos adecuados para conseguir un rendimiento o efecto sobre una determinada materia, cosa o asunto de interés. El término también puede referirse a cuando utilizamos o empleamos algo en específico con la finalidad de lograr un objetivo trazado. El objetivo primordial es conocer y comprender más profundamente una cuestión o situación, en busca de sus características, estado, naturaleza, función, entre otras (Sarduy, 2007).

La gestión o administración de operaciones es el conjunto de actividades para crear, implementar y mejorar los procesos que transforman las entradas de recursos en productos y servicios de salida. Las decisiones estratégicas de las empresas están orientadas a definir las acciones que deben emprenderse para asegurar las condiciones de supervivencia, crecimiento y rentabilidad sostenida que se esperan. Tales determinaciones se crean bajo situaciones de incertidumbre, puesto que no se conocen las circunstancias de futuro del entorno empresarial.

La aplicación de la administración de operaciones contribuye con la investigación y ejecución de todas aquellas acciones que generan el mayor valor agregado mediante la planificación, organización, dirección y control en la producción. Esto nos permite analizar los factores del sistema involucrados en la planificación de producción y su relación con los factores de producción. El propósito de este análisis es identificar situaciones futuras y potenciales de negocio, para reducir las condiciones de incertidumbre con el fin de asumir que tenga mayor posibilidad de éxito para la organización (Zúñiga, 2005).



La función principal del sistema de producción consiste en la transformación de materiales en productos que sean aptos para su consumo y que satisfagan las necesidades de la demanda. Se encarga de combinar los factores de producción con el fin de que el resultado obtenido sea el mejor posible (Tawfik, Chauvel, & Araiza, 1984).

Para que se pueda reducir este grado de incertidumbre como resultado del cambio constante del entorno, se deben respaldar sus decisiones en algo más que la intuición, deben respaldarlo en la elaboración de pronósticos correctos y precisos que sean suficientes para satisfacer las necesidades de planeación de la organización. Por lo tanto, se aplicarán las diferentes técnicas y herramientas de la administración de operaciones en el proceso de producción de mezcal.

## **1.2. Objetivos**

### **1.2.1. Objetivo General**

Analizar la productividad de un sistema no balanceado de producción de mezcal mediante técnicas cuantitativas para reducir la incertidumbre en la toma de decisiones.

### **1.2.2. Objetivos específicos**

1. Determinar la demanda de mezcal para pronosticar el abastecimiento del sistema, considerando sus características y condiciones de operación.
2. Construir un modelo de simulación de producción de mezcal.



3. Efectuar análisis de verificación y validación del modelo de simulación aplicando diseño de experimentos.
4. Identificar y proponer mejoras en el modelo de simulación, en base a los resultados obtenidos del proceso de producción de mezcal.

### **1.3. Justificación**

Con ayuda de un software para simular sistemas de producción y operaciones, se espera aportar propuestas y alternativas para la toma de decisiones. Ya que actualmente no se tienen muchos estudios concretos sobre el análisis de productividad en la producción de mezcal, por tal motivo, el presente trabajo nos permitirá analizar su posible viabilidad y evaluar las diferentes técnicas y herramientas de la administración de operaciones en sistemas no balanceados para reducir la incertidumbre.

### **1.4. Preguntas de investigación**

- a) ¿Qué condiciones y características se deben considerar para determinar el abastecimiento del sistema?
- b) ¿Cuál será la mejor estrategia para construir el modelo de simulación de producción de mezcal?
- c) ¿Cómo se puede efectuar el análisis de verificación y validación del modelo de simulación?
- d) ¿Qué variables o factores se deben considerar para implementar una mejora en el proceso?



## **1.5. Alcance y delimitaciones**

El planteamiento de este proyecto se realizará para aplicar y desarrollar herramientas de la administración de operaciones mediante un software de simulación, a fin encontrar alternativas para la toma de decisiones y poder brindar la posibilidad de posibles cambios. La planta productora de mezcal seleccionada para el desarrollo del proyecto está ubicada en el Municipio de San Felipe en la región norte del Estado de Guanajuato, donde se tiene la Denominación de Origen para producción de esta bebida alcohólica.

## **1.6. Hipótesis**

El tiempo de ciclo y el tamaño de la carga son variables suficientes para cuantificar la productividad de un sistema no balanceado y mediante un modelo de simulación y el uso de herramientas de la administración de operaciones como apoyo, permitirá evaluar mejoras o estimar la producción.





## **CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO**

### **2.1. Administración de los sistemas de producción y las operaciones**

La administración de operaciones y suministro (AOS) se entiende como el diseño, la operación y la mejora de los sistemas que crean y entregan los productos y los servicios primarios de una empresa. La AOS, al igual que el marketing y las finanzas, es un campo funcional de la empresa que tiene una clara línea de responsabilidades administrativas.

Este punto es importante porque la administración de operaciones y suministro muchas veces se confunde con la investigación de operaciones, la ciencia de la administración (IO/CA) y la ingeniería industrial (II). La diferencia esencial es que la AOS es un campo de la administración, mientras que la IO/CA representa la aplicación de métodos cuantitativos para la toma de decisiones en todos los campos y la II es una disciplina de la ingeniería.

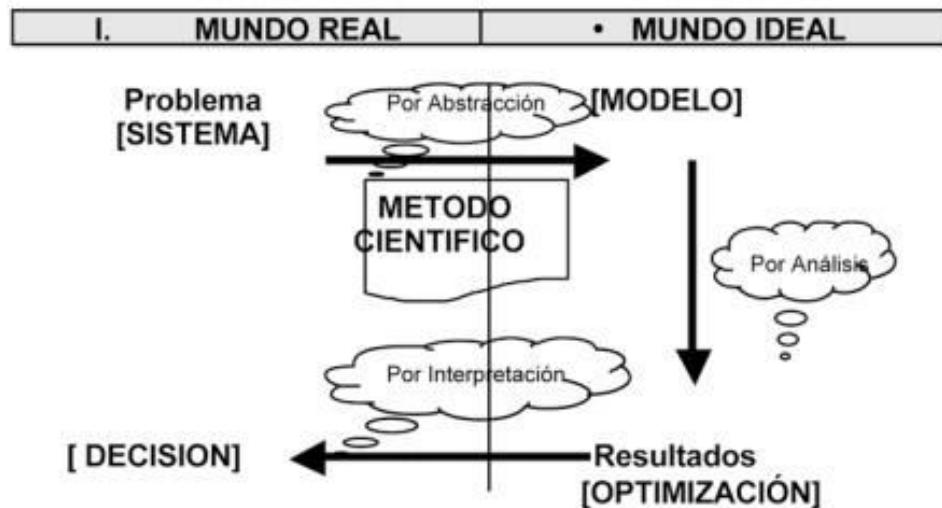
Por lo tanto, si bien los administradores de operaciones y suministro utilizan los instrumentos de la IO/CA para la toma de decisiones (como la programación de una ruta crítica) y se ocupan de muchos de los mismos temas que la II (como la automatización de la fábrica), la función administrativa de la AOS aclara la diferencia de otras disciplinas (Chase, Jacobs, & Aquilano, 2009).

#### **2.1.1. Noción, concepto y alcance de la investigación de operaciones (IO)**

Para encontrar una definición y un concepto de la IO, es necesario acudir a cinco elementos que se constituyen en la esencia primordial de esta herramienta: sistemas, modelos, optimización, decisión y método científico.



Estos elementos deben relacionarse de una manera estructural e integral, retroalimentándose continuamente. Estos cinco elementos, de acuerdo a la figura 2.1 basada en Pastor (2010), se plantean en términos de un contexto en los mundos real-ideal, donde a partir de un problema enfocado como sistema, se hace una abstracción del mismo en forma de modelo matemático para luego de un proceso de análisis, encontrar soluciones que lleven a la optimización del problema en el mundo real. Estas soluciones interpretadas deben constituirse en parámetros y orientaciones que ayuden a la toma de decisión y por ende a la solución sistemática del problema. Todo este proceso está apoyado y sustentado por el método científico que aporta la metodología apropiada para el análisis de problemas en el mundo de la IO.



Fuente: Pastor 2010

Figura 2.1. Relación de los cinco elementos de la IO con el mundo real e ideal

Gracias al análisis de estos cinco elementos, se puede construir una definición de investigación de operaciones, acorde con la naturaleza y alcance de esta importante herramienta.



La IO emplea el método científico en el análisis y solución de problemas del mundo real (industria, economía, comercio, educación, defensa, etc.) que deben ser concebidos como sistemas y entidades complejas que manejan recursos (equipos, útiles, información). Estos sistemas son representados en el mundo ideal por modelos matemáticos cuyo análisis y solución busca la optimización de resultados que deben ser interpretados y comprometidos para ofrecer asistencia y ayudar a la toma de decisiones (Pastor, 2010).

### **2.1.2. Pronósticos**

Pronosticar es el arte y la ciencia de predecir los eventos futuros. Puede implicar el uso de datos históricos y su proyección hacia el futuro mediante algún tipo de modelo matemático. Puede ser una predicción subjetiva o intuitiva, o puede ser una combinación de ambos, es decir, un modelo matemático ajustado por el buen juicio del administrador. Conforme introduzcamos las distintas técnicas de pronóstico en este capítulo, se dará cuenta que en realidad no existe un método superior. Lo que funciona mejor en una empresa con una serie de condiciones quizá sea un completo desastre en otra organización, o incluso en otro departamento de la misma empresa.

Además, observará que hay límites para lo que puede esperarse de los pronósticos. Pocas veces son perfectos. Su preparación y supervisión también implica un gasto de tiempo y dinero. Pocos negocios, sin embargo, se dan el lujo de eludir el proceso de pronosticar y sólo esperar a ver qué sucede, para después arriesgarse. La planeación efectiva a corto y largo plazo depende del pronóstico de la demanda de los productos de la compañía (Render & Heizer, 2009).



### 2.1.3. Tipos de pronósticos

Siempre que el hombre piense en el futuro, habrá una amplia posibilidad de que lo haga meditando en la forma en que lo va a enfrentar, preparándose o simulando situaciones en las cuales pueda sacarle el mejor provecho a los eventos que se les han de presentar en ese futuro analizado. En un breve sondeo llevado a cabo por los estudiantes de algunos cursos de la asignatura de Administración de la Producción se pudo indagar, que por ejemplo el empresario siempre respalda sus decisiones en base a previsiones hechas del futuro. Claro, indudablemente que este empresario en la mayoría de los casos no se apoya en métodos complejos pero así sea de la manera más rudimentaria en que este lleve a cabo sus previsiones, en esa misma manera estará pronosticando el desenvolvimiento de sus operaciones futuras. Es por eso a lo largo del tiempo han aparecido métodos de pronósticos creados por el hombre que le ayudan a reforzar sus decisiones con respecto al futuro (Pública, De, A., & Inversión, 2008).

Estos métodos de pronósticos se pueden clasificar en cuatro tipos básicos: cualitativo, análisis de series de tiempo, relaciones causales y simulación. Las técnicas cualitativas son subjetivas y se basan en estimados y opiniones. El análisis de series de tiempo, se basa en la idea de que es posible utilizar información relacionada con la demanda pasada para predecir la demanda futura. La información anterior puede incluir varios componentes, como influencias de tendencias, estacionales o cíclicas, y se describe en la sección siguiente. El pronóstico causal, que se analiza utilizando la técnica de la regresión lineal, supone que la demanda se relaciona con algún factor subyacente en el ambiente.

Los modelos de simulación permiten al encargado del pronóstico manejar varias suposiciones acerca de la condición del pronóstico. La tabla 2.1. describe una variedad de los cuatro tipos básicos de modelos de pronóstico (Chase, Jacobs, & Aquilano, 2009).

**Tabla 2.1. Técnicas de pronósticos y modelos comunes**

<b>I. CUALITATIVO</b>	Subjetivas de juicio. Basados en estimados y opiniones.
Técnicas acumulativas	Deriva de un pronóstico a través de la compilación de las entradas de aquellos que se encuentran al final de la jerarquía y que tratan con lo que pronostica.
Investigación de mercados	Se establece para recopilar datos de varias formas (encuestas, entrevistas, etc.) con el fin de comprobar hipótesis acerca del mercado. Por lo general, se utiliza para pronosticar ventas a largo plazo y de nuevos productos.
Grupos de consenso	Intercambio libre en las juntas. La idea es que la discusión en grupo produzca mejores pronósticos que cualquier individuo. Los participantes pueden ser ejecutivos, vendedores o clientes.
Analogía histórica	Relaciona lo pronosticado con un artículo similar. Es importante al planear nuevos productos en los que las proyecciones se pueden derivar mediante el uso del historial de un producto similar.
Método de Delfos	Un grupo de expertos responde un cuestionario. Un moderador recopila los resultados y formula un cuestionario nuevo que se presenta al grupo. Por lo tanto, existe un proceso de aprendizaje para el grupo mientras recibe información nueva y no existe ninguna influencia por la presión del grupo o individuos dominantes.
<b>II. ANÁLISIS DE SERIES DE TIEMPO</b>	Con base a la idea de que el historial de los eventos a través del tiempo se puede utilizar para proyectar el futuro.
Promedio móvil simple	Se calcula el promedio de un periodo que contiene varios puntos de datos dividiendo la suma de los valores de los puntos entre el número de éstos. Por lo tanto, cada uno tiene la misma influencia.
Promedio móvil ponderado	Puede ser que algunos puntos específicos se ponderen más o menos que los otros, según la experiencia.
Suavización exponencial	Los puntos de datos recientes se ponderan más y la ponderación sufre una reducción exponencial conforme los datos se vuelven más antiguos.
Análisis de regresión	Ajusta una recta a los datos pasados casi siempre en relación con el valor de los datos. La técnica de ajuste más común es la de los mínimos cuadrados.
<b>III. CAUSAL</b>	Trata de entender el sistema subyacente y que rodea al elemento que se va a pronosticar.
Análisis de regresión	Similar al método de mínimos cuadrados en las series de tiempo, pero puede contener diversas variables. La base es que el pronóstico se desarrolla por la ocurrencia de otros eventos.
Modelos econométricos	Intentos por describir algún sector de la economía mediante una serie de ecuaciones interdependientes.
Modelos entrada/salida	Se enfoca en las ventas de cada industria a otros gobiernos y empresas. Indica los cambios en las ventas que una industria productora puede esperar debido a los cambios en las compras por parte de otra industria.
Principales indicadores	Estadísticas que se mueven en la misma dirección que la serie a pronosticar, pero antes que ésta.
<b>IV. MODELOS DE SIMULACIÓN</b>	Modelos dinámicos, casi siempre por computadora, que permiten al encargado de las proyecciones hacer suposiciones acerca de las variables internas y el ambiente externo en el modelo.

Fuente: Chase, Jacobs, &amp; Aquilano, 2009



#### 2.1.4. Componentes de la demanda

En la mayor parte de los casos, la demanda de productos o servicios se puede dividir en seis componentes: demanda promedio para el periodo, una tendencia, elementos estacionales, elementos cíclicos, variación aleatoria y autocorrelación. La figura 2.2 muestra una demanda durante un periodo de 4 años, así como el promedio, la tendencia y los componentes estacionales o la aleatoriedad alrededor de la curva de la demanda uniformada. Los factores críticos son más difíciles de determinar porque quizá el tiempo se desconoce o no se toma en cuenta la causa del ciclo.

La influencia cíclica sobre la demanda puede provenir de eventos tales como elecciones políticas, guerras, condiciones económicas o presiones sociológicas. Las variaciones aleatorias son provocadas por los eventos fortuitos. Estadísticamente, al restar todas las causas conocidas de la demanda (promedio, tendencias, estacionales, cíclicas y de autocorrelación) de la demanda total, lo que queda es la parte sin explicar de la demanda. Si no se puede identificar la causa de este resto, se supone que es aleatoria (Chase, Jacobs, & Aquilano, 2009).

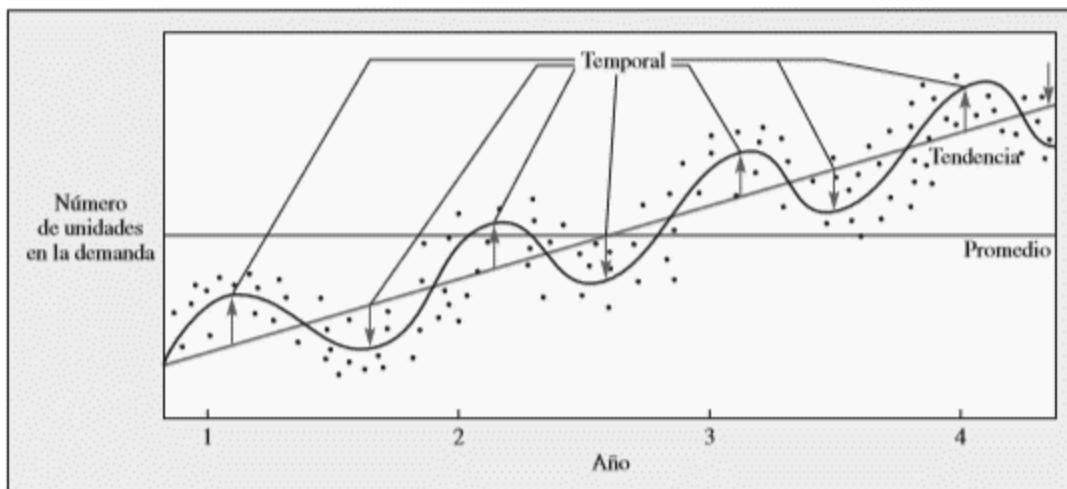


Figura 2.2. Demanda histórica de productos que consiste en una tendencia al crecimiento y una demanda temporal



La autocorrelación indica la persistencia de la ocurrencia. De manera más específica, el valor esperado en un momento dado tiene una correlación muy alta con sus propios valores anteriores. En la teoría de la línea de espera, la longitud de una línea de espera tiene una autocorrelación muy elevada. Es decir, si una línea es relativamente larga en un momento determinado, poco después de ese tiempo, podría esperarse que la línea siguiera siendo larga. Cuando la demanda es aleatoria, es probable que varíe en gran medida de una semana a otra. Donde existe una correlación alta, no se espera que la demanda cambie mucho de una semana a otra. Las líneas de tendencia casi siempre son el punto de inicio al desarrollar un pronóstico. Entonces, estas líneas de tendencia se ajustan de acuerdo con los efectos estacionales, los elementos cíclicos y cualquier otro evento esperado que puede influir en el pronóstico final (Chase, Jacobs, & Aquilano, 2009).

## **2.2. El diseño de experimentos hoy**

En el campo de la industria es frecuente hacer experimentos o pruebas con la intención de resolver un problema o comprobar una idea (conjetura, hipótesis); por ejemplo, hacer algunos cambios en los materiales, métodos o condiciones de operación de un proceso, probar varias temperaturas en una máquina hasta encontrar la que da el mejor resultado o crear un nuevo material con la intención de lograr mejoras o eliminar algún problema. Sin embargo, es común que estas pruebas o experimentos se hagan sobre la marcha, con base en el ensayo y error, apelando a la experiencia y a la intuición, en lugar de seguir un plan experimental adecuado que garantice una buena respuesta a las interrogantes planteadas. Algo similar ocurre con el análisis de los datos experimentales, donde más que hacer un análisis riguroso de toda la información obtenida y tomar en cuenta la variación, se realiza un análisis informal, “intuitivo”. Es tal el poder de la experimentación que, en ocasiones, se logran mejoras a pesar de que el experimento se hizo con base en el ensayo y error (Gutiérrez & De la Vara, 2012).



Sin embargo, en situaciones de cierta complejidad no es suficiente aplicar este tipo de experimentación, por lo que es mejor proceder siempre en una forma eficaz que garantice la obtención de las respuestas a las interrogantes planteadas en un lapso corto de tiempo y utilizando pocos recursos. El diseño estadístico de experimentos es precisamente la forma más eficaz de hacer pruebas. El diseño de experimentos consiste en determinar cuáles pruebas se deben realizar y de qué manera, para obtener datos que, al ser analizados estadísticamente, proporcionen evidencias objetivas que permitan responder las interrogantes planteadas, y de esa manera clarificar los aspectos inciertos de un proceso, resolver un problema o lograr mejoras (Gutiérrez & De la Vara, 2012).

### **2.3. Principios básicos del diseño de experimentos**

Para que un experimento pueda considerarse verdaderamente científico y catalogarse como un buen experimento, las conclusiones obtenidas de este deben tener validez, precisión y amplio cubrimiento.

Una conclusión de origen experimental es válida si está sustentada por técnicas estadísticas probadas anteriormente, y por datos que satisfagan los requisitos teóricos de esas técnicas. Hay dos exigencias teóricas sobre los datos: la ausencia de errores sistemáticos o sesgos y la independencia probabilística entre ellos. Si se garantizan estas condiciones, pueden obtenerse estimaciones insesgadas, tanto de los efectos promedio de los tratamientos como el error experimental.

Como ya se ha dicho, la clave para que un diseño origine buenos datos está en la asignación correcta de los tratamientos a las unidades experimentales, *ue*. Las condiciones de validez, precisión y generalidad, se satisfacen si el experimento se lleva a cabo teniendo en cuenta los tres principios básicos: aleatorización repetición y control del error experimental (Díaz, 2009).





### **2.3.1. Aleatorización**

Consiste en hacer las corridas experimentales en orden aleatorio (al azar) y con material también seleccionado aleatoriamente. Este principio aumenta la probabilidad de que el supuesto de independencia de los errores se cumpla, lo cual es un requisito para la validez de las pruebas de estadísticas que se realizan. También es una manera de asegurar que las pequeñas diferencias provocadas por materiales, equipo y todos los factores no controlados, se repartan de manera homogénea en todos los tratamientos. Una evidencia de incumplimiento o violación de este principio se manifiesta cuando el resultado obtenido en una prueba está muy influenciado por la prueba inmediata anterior.

### **2.3.2. Repetición**

Es correr más de una vez un tratamiento o una combinación de factores. Es preciso no confundir este principio con medir varias veces el mismo resultado experimental. Repetir es volver a realizar un tratamiento, pero no inmediatamente después de haber corrido el mismo tratamiento, sino cuando corresponda de acuerdo con la aleatorización. Las repeticiones permiten distinguir mejor qué parte de la variabilidad total de los datos se debe al error aleatorio y cuál a los factores. Cuando no se hacen repeticiones no hay manera de estimar la variabilidad natural o el error aleatorio, y esto dificulta la construcción de estadísticas realistas en el análisis de los datos (Gutiérrez & De la Vara, 2012).

### **2.3.3. Control de error experimental**

La estadística debe su existencia a la necesidad de analizar la variabilidad presente en los resultados de un fenómeno.



En particular, en los experimentos bien diseñados esta variabilidad ha sido modelada como se muestra en la ecuación 2.1.

$$\begin{aligned} \text{Dato observado} = & (\text{valor promedio poblacional}) + (\text{una cantidad debida al tratamiento usado}) \\ & + (\text{una cantidad debida a la unidad experimental}) \end{aligned} \quad \text{Ecuación 2.1}$$

La cantidad de variación atribuible a la  $ue$  proviene de dos fuentes: la variabilidad inherente al material experimental al que se lo aplican los tratamientos, y la falta de uniformidad en la condición física del experimento. El error sistemático surge de un proceso de experimentación deficiente que incluye carencia de aleatorización, instrumentos de medida mal calibrados, personal sin entrenamiento previo, etc. Una forma de evitar estos sesgos es, por tanto, el refinamiento de la técnica experimental. Si se supone que todas estas fallas se han remediado al máximo, aún queda una parte de la variación que no es controlable, ya sea porque proviene de causas desconocidas o porque, habiendo sido reconocidas, su control podría resultar muy complejo o muy costoso. Así, la porción remanente de la variación en las  $ue$  se atribuye a causas del azar y constituye el error aleatorio.

En un experimento bien diseñado deben eliminarse los sesgos y minimizarse el resto de variación, de tal manera que el error experimental resultante sea únicamente el mínimo error aleatorio que siempre está presente en cualquier investigación experimental.

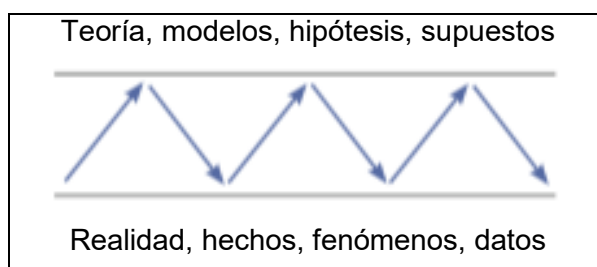
El diseño experimental se concibe como el proceso que lleva al control del error, entendiéndose como tal, aquellos pasos que conducen a tomar todas las precauciones necesarias para eliminar el máximo número de causas que producen error y reducir al mínimo la influencia de aquellas que no son eliminables. Es decir, en todo experimento hay error: la idea del diseño es reducir su magnitud, pues resulta imposible eliminarlo del todo (Díaz, 2009).



## 2.4. Diseño de experimentos en la investigación

Referente a lo que se ha dicho hasta el momento, (Gutiérrez & De la Vara, 2012) comenta que también es válido en el campo de la investigación científica o aplicada, ya que, a fin de cuentas, el objetivo es generar nuevas ideas y mejores respuestas a las interrogantes del investigador sobre el objeto de estudio.

El objetivo de los métodos estadísticos es lograr que el proceso de generar conocimiento y aprendizaje sea lo más eficiente posible. En este proceso, que ha demostrado ser secuencial, interactúan dos polos (figura 2.3), por un lado, están la teoría, los modelos, las hipótesis, las conjeturas y los supuestos; por el otro, están la realidad, los hechos, los fenómenos, la evidencia y los datos. Así, como se comenta en Box, G., & S. (1978), una hipótesis inicial lleva a un proceso de deducción en el que las consecuencias derivadas de la hipótesis pueden ser comparadas con los datos.



*Figura 2.3. Proceso interactivo de la experimentación*

Cuando las consecuencias y los datos no corresponden, entonces la discrepancia puede llevar a un proceso de inducción, en el cual se modifica la hipótesis original. De esta manera inicia un segundo ciclo de la interacción de teoría y datos, en el cual las consecuencias de la hipótesis modificada son comparadas con los datos (los viejos y los que se obtengan en este nuevo ciclo); esto puede llevar a futuras modificaciones y a la obtención de conocimiento (Gutiérrez & De la Vara, 2012).



## 2.5. Definiciones básicas en el diseño de experimentos

Lye (2005) define Diseño de Experimentos (DOE) como una metodología para aplicar sistemáticamente la estadística a la experimentación. Consiste, en realizar una serie de pruebas en las que se inducen cambios deliberados en las variables de entrada a un proceso de manera que sea posible observar e identificar las causas de los cambios en la respuesta de la salida elegida.

Montgomery (2005) establece que la importancia del diseño de experimentos recae en la necesidad que tienen las empresas de contar con procesos óptimos con la menor variabilidad para incrementar la calidad en sus productos o servicios. Con esta técnica se puede conseguir entre otras, mejorar el rendimiento de un proceso, reducir su variabilidad y reducir los costos de producción.

El diseño de experimentos es la aplicación del método científico para generar conocimiento acerca de un sistema o proceso, por medio de pruebas planeadas adecuadamente. Esta metodología se ha ido consolidando como un conjunto de técnicas estadísticas y de ingeniería, que permiten entender mejor algunas situaciones complejas de relación causa-efecto (Gutiérrez & De la Vara, 2012).

De acuerdo con Coss (2003), el diseño de experimentos es un tópico cuya relevancia en experimentos de simulación ha sido reconocida pero raramente aplicado. El diseño de experimentos en estudios de simulación puede ser de varios tipos, dependiendo de los propósitos específicos que se hayan planteado. Existen varios tipos de análisis que pueden ser requeridos. Entre los más comunes e importantes se pueden mencionar los siguientes; comparación de las medias y varianzas de las alternativas analizadas, determinación de la importancia y el efecto de diferentes variables en los resultados de simulación, y, por último, búsqueda de los valores óptimos de un conjunto de variables.



### 2.5.1. Variables, factores y niveles

En todo proceso intervienen distintos tipos de variables o factores como los que se muestran en la figura 2.4, donde también se aprecian algunas interrogantes al planear un experimento.

Variable(s) de respuesta. A través de esta(s) variable(s) se conoce el efecto o los resultados de cada prueba experimental (figura 2.4), por lo que pueden ser características de la calidad de un producto y/o variables que miden el desempeño de un proceso. El objetivo de muchos estudios experimentales es encontrar la forma de mejorar la(s) variable(s) de respuesta. Por lo general, estas variables se denotan con la letra *y* (Gutiérrez & De la Vara, 2012).

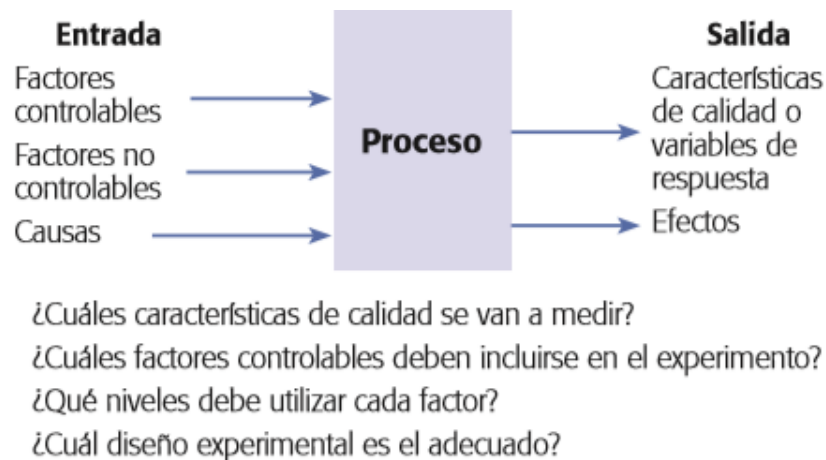


Figura 2.4. Variables de un proceso y preguntas a responder al diseñar un experimento

Factores controlables. Son variables de proceso o características de los materiales experimentales que se pueden fijar en un nivel dado.



Algunos de éstos son los que usualmente se controlan durante la operación normal del proceso (figura 2.4), y se distinguen porque, para cada uno de ellos, existe la manera o el mecanismo para cambiar o manipular su nivel de operación. Esto último es lo que hace posible que se pueda experimentar con ellos. Algunos factores o características que generalmente se controlan son: temperatura, tiempo de residencia, cantidad de cierto reactivo, tipo de reactivo, método de operación, velocidad, presión, etc. A los factores controlables también se les llama variables de entrada, condiciones de proceso, variables de diseño, parámetros del proceso, las  $x$  de un proceso o simplemente factores.

Factores no controlables o de ruido. Son variables o características de materiales y métodos que no se pueden controlar durante el experimento o la operación normal del proceso. Por ejemplo, algunos factores que suelen ser no controlables son las variables ambientales (luz, humedad, temperatura, partículas, ruido, etc.), el ánimo de los operadores, la calidad del material que se recibe del proveedor (interno o externo). Un factor que ahora es no controlable puede convertirse en controlable cuando se cuenta con el mecanismo o la tecnología para ello.

Factores estudiados. Son las variables que se investigan en el experimento, respecto de cómo influyen o afectan a la(s) variable(s) de respuesta. Los factores estudiados pueden ser controlables o no controlables, a estos últimos quizá fue posible y de interés controlarlos durante el experimento. Para que un factor pueda ser estudiado es necesario que durante el experimento se haya probado en, al menos, dos niveles o condiciones. En principio, cualquier factor, sea controlable o no, puede tener alguna influencia en la variable de respuesta que se refleja en su media o en su variabilidad.

Para fines de un diseño de experimentos deben seleccionarse los factores que se considera, por conocimiento del objeto de estudio, que pueden tener efecto sobre la respuesta de interés (Gutiérrez & De la Vara, 2012).



Obviamente, si se decide o interesa estudiar el efecto de un factor no controlable, parte de la problemática a superar durante el diseño es ver la manera en que se controlará durante el experimento tal factor.

Niveles y tratamientos. Los diferentes valores que se asignan a cada factor estudiado en un diseño experimental se llaman niveles. Una combinación de niveles de todos los factores estudiados se llama tratamiento o punto de diseño. Por ejemplo, si en un experimento se estudia la influencia de la velocidad y la temperatura, y se decide probar cada una en dos niveles, entonces cada combinación de niveles (velocidad, temperatura) es un tratamiento. En este caso habría cuatro tratamientos, como se muestra en la tabla 2.2.

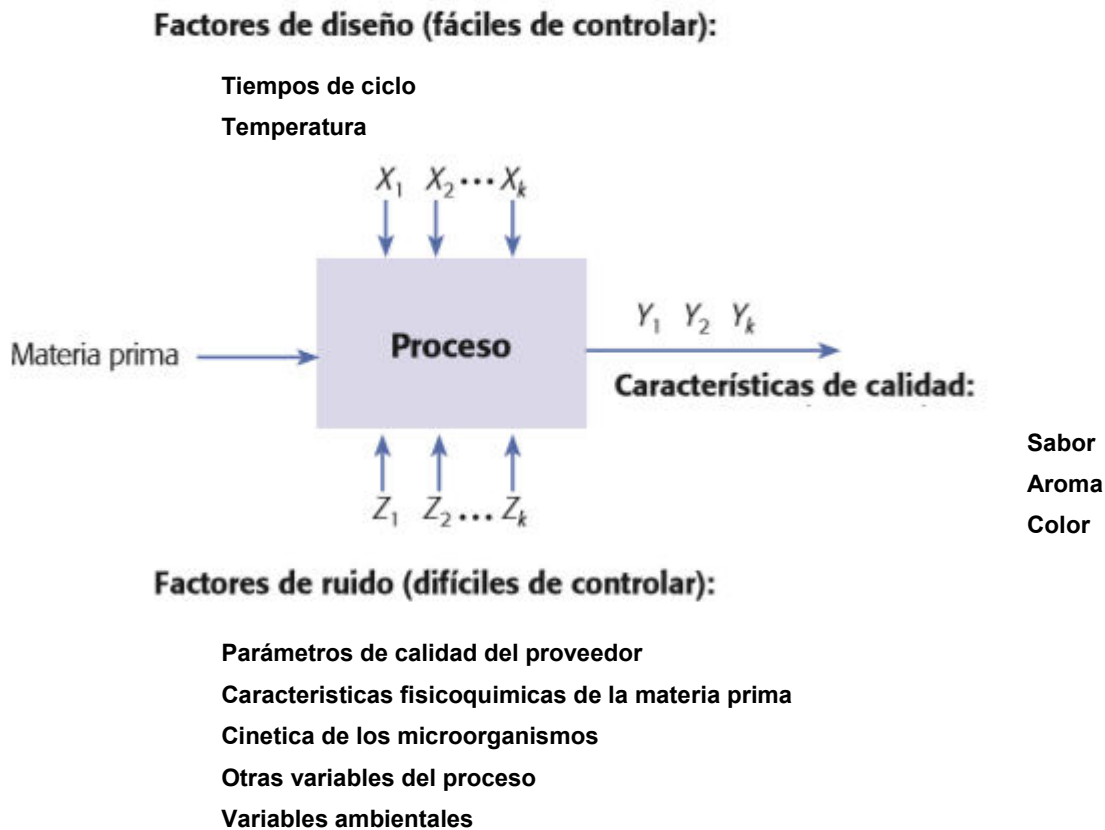
*Tabla 2.2. Puntos de diseño o tratamientos*

Nivel de velocidad	Nivel de temperatura	Tratamiento	$y$
1	1	1	
2	1	2	
1	2	3	
2	2	4	?

De acuerdo con estas definiciones, en el caso de experimentar con un solo factor, cada nivel es un tratamiento. Cuando se corre un diseño experimental es importante que la variabilidad observada de la respuesta se deba principalmente a los factores estudiados y en menor medida al error aleatorio, y además que este error sea efectivamente aleatorio. Cuando la mayor parte de la variabilidad observada se debe a factores no estudiados o a un error no aleatorio, no se podrá distinguir cuál es el verdadero efecto que tienen los factores estudiados, con lo que el experimento no alcanzaría su objetivo principal (Gutiérrez & De la Vara, 2012).



De aquí la importancia de no dejar variar libremente a ningún factor (figura 2.5) que pueda influir de manera significativa sobre el comportamiento de la respuesta, mejor conocido como el principio de bloqueo (Gutiérrez & De la Vara, 2012).



Fuente: adaptado al sistema de producción de mezcal

Figura 2.5. Factores y variables en la producción de mezcal

## 2.6. Diseño Factorial

El diseño estadístico de experimentos contempla una amplia variedad de estrategias experimentales que son adecuadas para generar la información que se busca.





Los diseños factoriales son ampliamente utilizados en experimentos en los que intervienen varios factores para estudiar el efecto conjunto de éstos sobre una variable de interés. Existen varios casos especiales del diseño factorial general que resultan importantes porque se usan ampliamente en el trabajo de investigación, además de constituir la base para otros diseños de gran valor práctico.

Uno de los más importantes de estos casos especiales ocurre cuando se tienen  $k$  factores, cada uno con dos niveles, este se conoce como diseño factorial  $2^k$ . Este describe los experimentos más adecuados para conocer simultáneamente qué efecto tienen  $k$  factores sobre una respuesta y descubrir si interaccionan entre ellos. Los niveles pueden ser cuantitativos como sería el caso de dos valores de temperatura, presión o tiempo pero también pueden ser cualitativos como sería el caso de dos máquinas, dos operadores, los niveles "superior" e "inferior" de un factor, o quizás, la ausencia o presencia de un factor. Una réplica completa de tal diseño requiere que se recopilen  $2 \times 2 \times \dots \times 2 = 2^k$  observaciones y se conoce como diseño general  $2^k$  (Medina Varela & Lopez Reyes, 2011).

Estos experimentos están planeados de forma que se varían simultáneamente varios factores pero se evita que se cambien siempre en la misma dirección. Al no haber factores correlacionados se evitan experimentos redundantes. Además, los experimentos se complementan de tal modo que la información buscada se obtiene combinando las respuestas de todos ellos.

Esto permite obtener la información con el mínimo número de experimentos (y por tanto, con el menor costo) y con la menor incertidumbre posible (porque los errores aleatorios de las respuestas se promedian). Un experimento factorial permite investigar todas las combinaciones posibles de los niveles de los factores o condiciones en cada prueba completa. Los tratamientos constan de todas las combinaciones que puedan formarse de los distintos factores, entendiéndose como tratamientos la denominación de los diferentes procesos cuyos efectos van a ser medidos o comparados.



El objetivo es investigar los resultados experimentales en casos donde interesa estudiar el efecto de diversas condiciones de experimentación y sus interacciones (Cochran & Cox, 1990).

Para optimizar procesos de fabricación, condiciones de reacción y métodos de análisis entre otros, es necesario conocer qué variables influyen significativamente en el sistema y como lo afectan. A menudo esta información no está disponible y se genera experimentando. Primero se recogen en una lista todas las variables que podrían influir en la respuesta, que es una variable de interés que se mide como consecuencia de la experimentación (Ferré & Rius, 2003).

El método tradicional de variar un factor cada vez no suele ser la mejor opción. Puede implicar más experimentos de los necesarios y, a pesar de ello, proporcionar sólo información parcial (Cruz, Restrepo, & Medina, 2006). Por ejemplo, no mostrará si existe interacción entre factores. Las interacciones suelen ser muy corrientes y a veces son los efectos más importantes, por lo que conocerlas es imprescindible para comprender el comportamiento de muchos sistemas.

## **2.7. Análisis de varianza (ANOVA)**

El análisis de varianza (ANOVA cuyas siglas significan Analysis of Variance, según la terminología inglesa) es una colección de modelos estadísticos y sus procedimientos asociados, en el cual la varianza está particionada en ciertos componentes debidos a diferentes variables. Es un método para comparar dos o más medias, que es necesario porque cuando se quiere comparar más de dos medias es incorrecto utilizar repetidamente el contraste basado en la *t* de student, por dos motivos. En primer lugar, y como se realizarían simultánea e independientemente varios contrastes de hipótesis, la probabilidad de encontrar alguno significativo por azar aumentaría.



Por otro lado, en cada comparación la hipótesis nula es que las dos muestras provienen de la misma población, por lo tanto, cuando se hayan realizado todas las comparaciones, la hipótesis nula es que todas las muestras provienen de la misma población y, sin embargo, para cada comparación, la estimación de la varianza necesaria para el contraste es distinta, pues se ha hecho en base a muestras distintas.

Tabla 2.3. Anova para un sistema de medición con dos factores

<i>Fuente de variación</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Cuadrados medios</i>
<i>Factor 1</i>	<i>SSA</i>	$a - 1$	$MSA = \frac{SSA}{a - 1}$
<i>Factor 2</i>	<i>SSB</i>	$b - 1$	$MSB = \frac{SSB}{b - 1}$
<i>Interacción</i>	<i>SSAB</i>	$(a - 1)(b - 1)$	$MSAB = \frac{SSAB}{(a - 1)(b - 1)}$
<i>Error</i>	<i>SSE</i>	$ab(n - 1)$	$MSE = \frac{SSE}{ab(n - 1)}$
<i>Total</i>	<i>SST</i>	$N - 1$	

Fuente: Botero, Arbeláez & Mendoza, 2007

El método que resuelve ambos problemas es el ANOVA, aunque es algo más que esto, es un método que permite comparar varias medias en diversas situaciones; muy ligado, por tanto, al diseño de experimentos y, de alguna manera, es la base del análisis multivariante (de Vargas & Santos, 1996).



## 2.8. Métodos asociativos de pronóstico: análisis de regresión y correlación

A diferencia del pronóstico de series de tiempo, los modelos de pronóstico asociativo casi siempre consideran varias variables que están relacionadas con la cifra por predecir. Una vez que se encuentran estas variables relacionadas, se construye un modelo estadístico que se usa para pronosticar el elemento de interés.

Este enfoque es más poderoso que los métodos de series de tiempo que incluyen sólo variables históricas para la variable que se pronostica. El análisis asociativo puede considerar muchos factores. El modelo de pronósticos asociativo cuantitativo más común es el análisis de regresión lineal y representa un modelo matemático de línea recta para describir las relaciones funcionales entre las variables dependiente e independiente (Render & Heizer, 2009).

### 2.8.1. Uso del análisis de regresión para pronosticar

Podemos emplear el mismo modelo matemático que usamos con el método de mínimos cuadrados para la proyección de tendencias, con el fin de realizar un análisis de regresión lineal. Las variables dependientes que deseamos pronosticar se simbolizan con  $\hat{y}$ . Pero la variable independiente,  $x$ , ya no necesita ser el tiempo, usamos la ecuación 2.1 (Render & Heizer, 2009).

$$\hat{y} = a + bx$$

*Ecuación 2.2*

donde  $\hat{y}$  = valor de la variable dependiente  
 $a$  = intersección con el eje  $y$  (ordenada)  
 $b$  = pendiente de la recta de regresión  
 $x$  = variable independiente



### 2.8.2. Error estándar de la estimación

Con el propósito de medir la precisión de las estimaciones de regresión, debemos calcular el error estándar de la estimación ( $S_{y,x}$ ), que es una medida de la variabilidad alrededor de la recta de regresión. Este cálculo se llama desviación estándar de la regresión y mide el error desde la variable dependiente,  $y$ , hasta la recta de regresión, en lugar de hasta la media. La ecuación 2.3 es una expresión similar a la encontrada en la mayoría de los libros de estadística para calcular la desviación estándar de una media aritmética (Render & Heizer, 2009).

$$S_{y,x} = \sqrt{\frac{\sum(y - y_c)^2}{n - 2}} \quad \text{Ecuación 2.3}$$

donde  $y$  = valor de  $y$  de cada dato puntual

$y_c$  = valor calculado de la variable dependiente, a partir de la ecuación de regresión

$n$  = número de datos puntuales

### 2.8.3. Coeficientes de correlación para rectas de regresión

La ecuación de regresión es una forma de expresar la naturaleza de la relación entre dos variables. Las rectas de regresión no son relaciones de "causa y efecto", simplemente describen las relaciones entre variables. La ecuación de regresión muestra la forma en que una variable se relaciona con el valor y los cambios en otra variable. Otra forma de evaluar la relación entre dos variables consiste en calcular el coeficiente de correlación. Para calcular  $r$ , empleamos casi los mismos datos empleados para calcular  $a$  y  $b$  para la recta de regresión. La ecuación 2.4 para  $r$  es (Render & Heizer, 2009).



$$r = \frac{n \sum xy - \sum x \sum y}{\sqrt{[n \sum x^2 - (\sum x)^2][n \sum y^2 - (\sum y)^2]}}$$

Ecuación 2.4

Esta medida expresa el grado o fuerza de la relación lineal. Casi siempre identificado como  $r$ , el coeficiente de correlación puede ser cualquier número entre  $+1$  y  $-1$ . En la figura 2.6 se ilustra cómo se observan los distintos valores de  $r$ . Una  $r$  alta no siempre significa que una variable será un buen predictor de la otra.

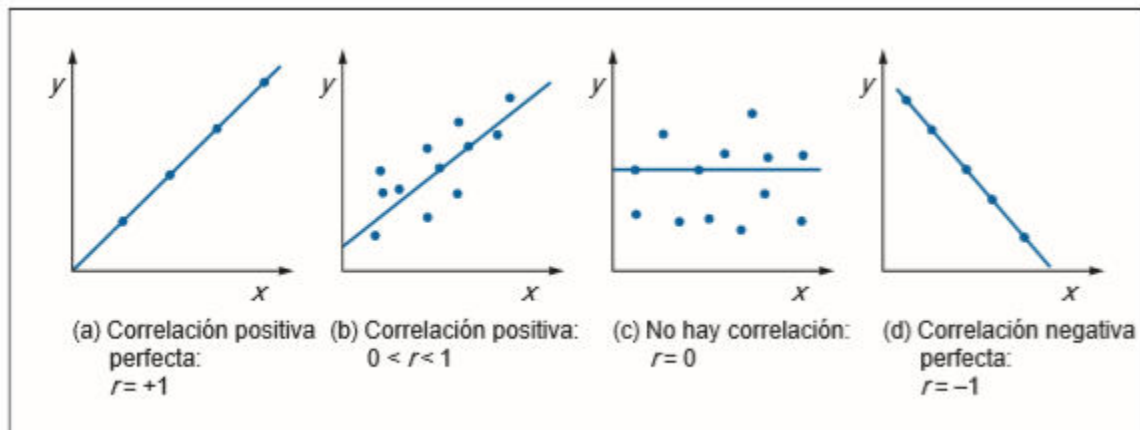


Figura 2.6. Cuatro valores del coeficiente de correlación

Si bien el coeficiente de correlación es la medida más común para describir las relaciones entre dos variables, existe otra medida que expresa la cantidad de variación en la variable dependiente respecto de su media que explica la ecuación de regresión y se llama coeficiente de determinación, es simplemente el cuadrado del coeficiente de correlación, a saber,  $r^2$ . El valor de  $r^2$  siempre será un número positivo en el intervalo de  $0 \leq r^2 \leq 1$ . El coeficiente de determinación es el porcentaje de variación en la variable dependiente ( $y$ ) que explica la ecuación de regresión (Render & Heizer, 2009).



## 2.9. Gráficas de Gantt

Las gráficas de Gantt fueron desarrolladas por Henry Laurence Gantt a finales del siglo XIX durante sus trabajos en la primera guerra mundial, como la programación del arsenal. Inicialmente, los diagramas de Gantt eran una herramienta de planificación de la producción utilizada para planificar y gestionar la producción por lotes.

En términos modernos, Gantt utilizó un enfoque de demanda dependiente de la fase de tiempo para la planificación de la producción. La planificación de la producción de Gantt funcionó de manera "top-down" al vincular los requisitos del artículo con sus componentes constitutivos con la producción en fases para permitir que todos los componentes estén disponibles cuando sea necesario para la actividad de producción posterior (Wilson, 2003).

En la actualidad, son una ayuda visual muy útil para determinar las cargas de trabajo y la programación, donde se muestran las fechas de inicio y termino de las actividades, además de la duración estimada. Las gráficas expresan el uso de los recursos; los centros de trabajo y la mano de obra. El gráfico de Gantt es la forma habitual de presentar el plan de ejecución de un proyecto, recogiendo en las filas la relación de actividades a realizar y en las columnas la escala de tiempos que estamos manejando, mientras la duración y situación en el tiempo de cada actividad se representa mediante una línea dibujada en el lugar correspondiente.

La utilidad de un gráfico de este tipo es mayor cuando se añaden los recursos y su grado de disponibilidad en los momentos oportunos. Como ventajas tendríamos la facilidad de construcción y comprensión, y el mantenimiento de la información global del proyecto. Y como desventajas, que no muestra relaciones entre tareas ni la dependencia que existe entre ellas, y que el concepto de % de realización es un concepto subjetivo (Render & Heizer, 2009).



Cuando se usan para cargar, las gráficas de Gantt muestran las cargas y los tiempos ociosos de diversos departamentos, máquinas o instalaciones. Despliegan las cargas de trabajo relativas en el sistema para que el administrador sepa que ajustes son adecuados. Cuando un centro de trabajo esta sobrecargado, pueden transferirse empleados desde otro centro que tenga poca carga para aumentar la fuerza de trabajo. O si los trabajos en espera se procesan en centros de trabajo diferentes, algunos trabajos de los centros con sobrecarga pueden transferirse a los centros con poca carga. También es común transferir el equipo versátil de un centro a otro. En la figura 2.6 se ilustra que la tarea A está atrasada en aproximadamente medio día con respecto al programa al final del día 5. La tarea B se completó después del mantenimiento dado al equipo. La tarea C va adelantada con respecto al programa (Render & Heizer, 2009).

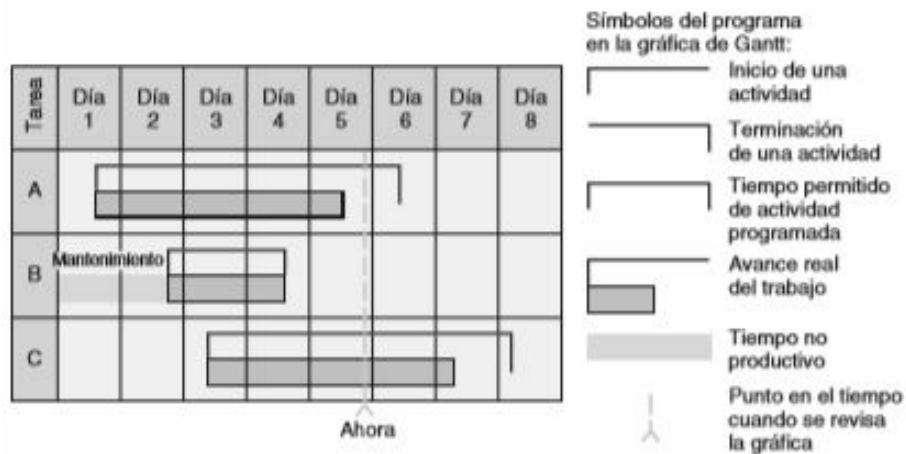


Figura 2.7. Gráfica de Gantt para programar los trabajos A, B y C

La gráfica de Gantt de carga tiene una limitación importante: No toma en cuenta la variabilidad de la producción, como descomposturas inesperadas o errores humanos que requieren repetir algún trabajo.





En consecuencia, la gráfica debe actualizarse en forma regular para que refleje los nuevos trabajos y las estimaciones de tiempo calculadas. Una gráfica de Gantt de programación se usa para vigilar el avance de los trabajos. Indica qué tareas están a tiempo y cuáles están adelantadas o atrasadas. En la práctica, se encuentran muchas versiones de esta gráfica (Render & Heizer, 2009).

## 2.10. Teoría de restricciones

La Teoría de Restricciones es una filosofía de administración basada en sistemas que se utiliza para ayudar en la mejora continua del rendimiento de un sistema al centrarse en los problemas centrales que están impidiendo que el sistema alcance su objetivo (Inman, Sale, & Green, 2009). El enfoque de la Teoría de Restricciones se basa en el pensamiento sistémico (Taylor III & Churchwell, 2004) y como tal, considera el rendimiento general del sistema en lugar de centrarse en mejorar el desempeño de una tarea individual o componente en el sistema.

La Teoría de Restricciones reconoce que cada sistema tiene elementos que limitan su rendimiento, denominados "restricciones" (Gupta & Kline, 2008). La Teoría de Restricciones asume que solo hay unas pocas restricciones en cualquier sistema dado; por lo general solo uno (Mabin & Baldestone, 2000). Goldratt y Cox (2016) definen una restricción como "cualquier elemento o factor que limita el sistema de hacer más de lo que fue diseñado para lograr (es decir, lograr su Gol)". Las limitaciones de los sistemas pueden ser físicas (por ejemplo, maquinaria, personal especializado o materias primas), materiales, políticas (cuando las políticas de una organización no se ajustan en respuesta a cambios que tienen lugar dentro del entorno en el que opera) o de comportamiento (prácticas existentes en una organización). Rahman (1998) afirma que la mayoría de las organizaciones tienen más políticas limitaciones que las físicas.



La Teoría de Restricciones alienta a los gerentes a identificar las restricciones y encontrar formas de eliminarlas (Simatupang, Wright, & Sridharan, 2004). La base de la teoría de restricciones es el reconocimiento y manejo de estas limitaciones mediante un proceso de cinco pasos:

Paso 1: Identificar las restricciones.

Paso 2: Desarrollar un plan para superar las restricciones identificadas.

Paso 3: Enfocar los recursos a lograr el paso 2.

Paso 4: Reducir los efectos de las restricciones restando carga de trabajo o ampliando la capacidad. Asegurarse de que todas las personas afectadas por las restricciones las reconozcan.

Paso 5: Cuando un conjunto de restricciones se supere, volver al paso 1 e identificar nuevas restricciones.

### **2.10.1. Cuello de botella y recursos restringidos por la capacidad**

Un cuello de botella se define como cualquier recurso cuya capacidad sea menor que su demanda. Un cuello de botella es una restricción en el sistema que limita la producción. En el proceso de manufactura, es el punto donde el caudal se adelgaza hasta ser una corriente flaca. Un cuello de botella puede ser una máquina, falta de trabajadores capacitados o una herramienta especial. En las observaciones de la industria se ha visto que la mayoría de las plantas tienen operaciones con cuellos de botella (Chase, Jacobs, & Aquilano, 2009).



La capacidad se define como el tiempo disponible para la producción. Aquí se excluyen mantenimiento y otros tiempos sin trabajar. Un canal despejado es todo recurso cuya capacidad es mayor que la demanda que se le impone. Por lo tanto, un canal despejado no debe trabajar de continuo, ya que produciría más de lo que se necesita. Un canal despejado incluye tiempo ocioso.

Un recurso restringido por la capacidad (capacity-constrained resource, CCR) es aquel cuya utilización está cerca de la capacidad y podría ser un cuello de botella si no se programa con cuidado. Por ejemplo, un CCR podría recibir trabajo de varias fuentes en un entorno de planta fabril. Si estas fuentes programan su ritmo de manera que se genere tiempo ocioso ocasional para el CCR que supere su capacidad sin usar, el CCR se convierte en cuello de botella cuando el volumen del trabajo llega más tarde. Esto ocurre si se cambia el tamaño de los lotes o si alguna de las operaciones anteriores no funciona por cualquier motivo y no envía suficiente trabajo al CCR (Chase, Jacobs, & Aquilano, 2009).

Los centros de trabajo que se constituyen en cuellos de botella son restricciones que limitan la salida de producción. Los cuellos de botella tienen menos capacidad que el centro de trabajo anterior o siguiente, y limitan la salida de productos. Los cuellos de botella son una ocurrencia común porque incluso los sistemas bien diseñados pocas veces duran en equilibrio mucho tiempo. Cambiar productos, mezclas de productos y volúmenes muchas veces crea varios cuellos de botella, que también se modifican con el tiempo. En consecuencia, los centros de trabajo forman cuellos de botella en casi todas las instalaciones orientadas al proceso, desde hospitales y restaurantes hasta fábricas (Render & Heizer, 2009).

Los administradores de operaciones exitosos hacen frente a los cuellos de botella aumentando su capacidad, cambiando las rutas de trabajo, el tamaño de los lotes, la secuencia del trabajo o aceptando la inactividad en otras estaciones de trabajo. Existen varias técnicas para enfrentar los cuellos de botella, e incluyen:



- Incrementar la capacidad de la restricción. Esto podría requerir una inversión de capital o más personal y su implementación tomaría tiempo.
- Asegurar la disponibilidad de empleados calificados, con capacitación cruzada, para operar y mantener completamente el centro de trabajo que ocasiona la restricción.
- Desarrollar alternativas para las rutas, los procedimientos de procesamiento o los subcontratistas.
- Trasladar las inspecciones y pruebas a un lugar que esté justo antes del cuello de botella. Este enfoque ofrece la ventaja de que rechaza los defectos potenciales antes de que entren al cuello de botella.
- Programar la producción para que se ajuste a la capacidad del cuello de botella.

Lo anterior podría significar que se programe menos trabajo en los centros de trabajo que surten al cuello de botella (Render & Heizer, 2009).

### **2.10.2. Tambor, amortiguador, sogá**

Tambor, amortiguador, sogá es otra idea de la teoría de restricciones. Todo sistema de producción necesita uno o varios puntos de control del paso de los productos. Si el sistema contiene un cuello de botella, ahí está el mejor lugar para situar un control. Este punto de control se llama tambor porque marca el ritmo para el funcionamiento del resto del sistema (o de las partes en las que influye). Recuerde que un cuello de botella se define como un recurso que no tiene capacidad para satisfacer la demanda (Render & Heizer, 2009).

Por lo tanto, un cuello de botella tiene que trabajar todo el tiempo y un motivo para usarlo como punto de control es cerciorarse de que las operaciones anteriores no generan tanto que se acumula inventario de trabajos sin terminar que el cuello de botella no pueda manejar.



Si no hay un cuello de botella, el siguiente mejor lugar para poner el tambor sería un recurso restringido por la capacidad (CCR), es el que opera casi a toda su capacidad, pero, en promedio, tiene capacidad suficiente siempre que no se programe mal (por ejemplo, con demasiadas preparaciones que agoten su capacidad o que produzca un lote tan grande que deje sin trabajo a las operaciones siguientes). Si no hay cuellos de botella ni CCR, el punto de control puede designarse donde sea.

En general, la mejor ubicación sería en algún punto de divergencia donde la producción del recurso se use en varias operaciones siguientes. Siempre es más difícil manejar un cuello de botella y esta exposición se enfoca en asegurarse de que los cuellos de botella siempre tengan trabajo que hacer

En la figura 2.8 se muestra un flujo lineal simple de A-G. Supóngase que el recurso D, que es un centro de máquinas, es un cuello de botella. Esto significa que las capacidades son mayores antes y después. Si esta secuencia no se controla, sería de esperar que hubiera un inventario voluminoso en el centro de trabajo D y muy poco en otras partes. Sería magro el inventario de bienes terminados porque (dada la definición de cuello de botella) todos los productos se llevarían al mercado (Render & Heizer, 2009).

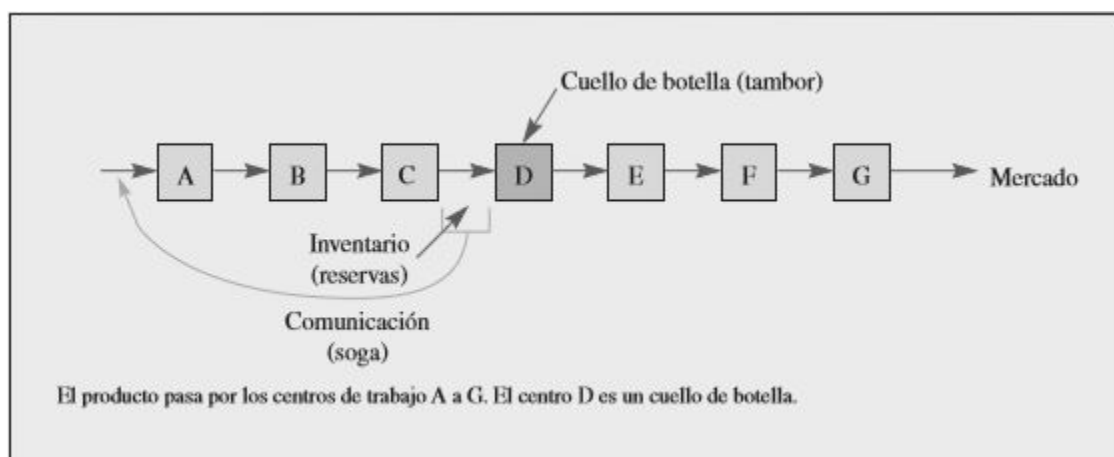


Figura 2.8. Flujo lineal de un producto con cuello de botella



Deben hacerse dos cosas con este cuello de botella:

1. Poner ahí un inventario de reserva para que siempre tenga trabajo. Como es un cuello de botella, su producción determina lo producido por el sistema.
2. Comunicar a A lo que D produce, para que A proporcione sólo ese monto y, así, no se acumule el inventario. Esta comunicación se llama sogá. Puede ser formal (como en un programa) o informal (como en los comentarios cotidianos).

El inventario de reserva al comienzo de la operación del cuello de botella representa un tiempo de reserva. Se quiere que el centro de trabajo D siempre tenga qué hacer y no importa en cuál de los productos programados trabaje.

A la pregunta sobre de cuánto debe ser el tiempo de reserva, la respuesta es: cuanto sea necesario para que el cuello de botella no deje de trabajar. Al examinar la variación de cada operación, es posible hacer una conjetura. En teoría, el tamaño de la reserva puede calcularse estadísticamente examinando los datos del desempeño anterior o bien es posible simular la secuencia.

En cualquier caso, la precisión no es crucial. Podría partirse de una estimación del tiempo de reserva como un cuarto del tiempo total de espera del sistema. La experiencia es el mejor determinante del tamaño final de la reserva. Si el tambor no es un cuello de botella sino un CCR (y puede tener menos tiempo ocioso), quizá convenga crear dos inventarios de reserva: uno antes del CCR y el segundo al final, como bienes terminados (figura 2.9). El inventario de bienes terminados protege el mercado y el tiempo de reserva antes del CCR protege el producto. Para este caso del CCR, el mercado no asimila todo lo que puede producirse, así que hay que asegurarse de que haya bienes terminados cuando el mercado decida comprar (Render & Heizer, 2009).

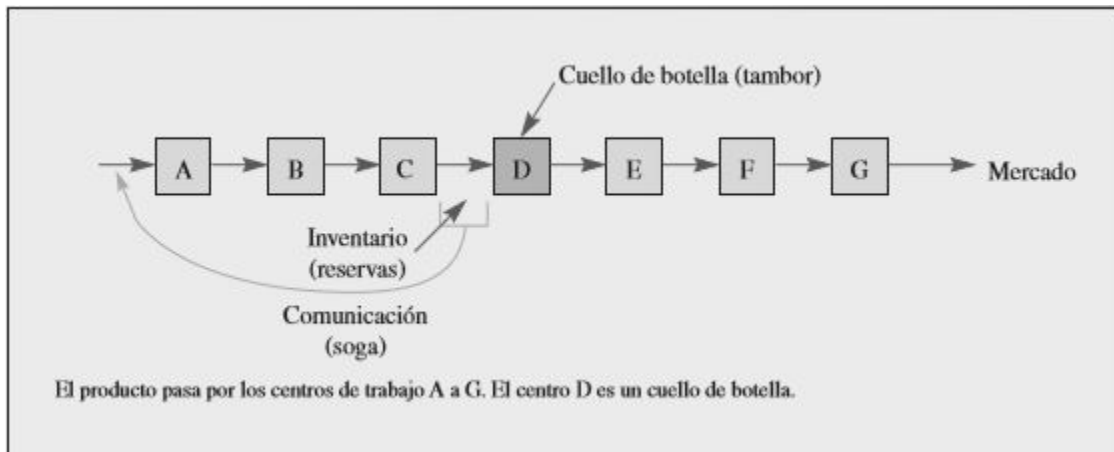


Figura 2.9. Flujo lineal de productos con un recurso restringido por la capacidad

## 2.11. Ley de Little

Una relación fundamental que se usa ampliamente en la teoría de colas es la Ley de Little. La Ley de Little establece una relación entre tres cantidades fundamentales: la tasa promedio ( $\lambda$ ) de los clientes que llegan a un sistema, el tiempo promedio ( $w$ ) que un cliente pasa en el sistema y el número promedio de clientes en el sistema.

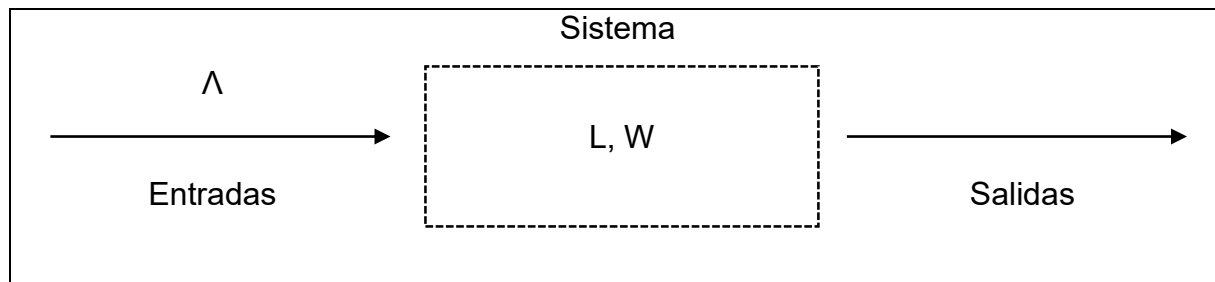
Esta relación está dada por  $L = \lambda W$ , dados dos de las tres cantidades, uno puede inferir el tercero (ecuación 2.5). Por ejemplo, si uno puede observar a los clientes que salen de una tienda (rindiendo una estimación para  $\lambda$ ) y uno puede preguntar a cada cliente cuánto tiempo estuvo en la tienda (estimando  $w$ ), puede estimar  $L$  el número promedio de clientes en la tienda. La Ley de Little es un resultado muy general y se puede aplicar a una amplia variedad de sistemas, incluso los sistemas que pueden no ser considerados como colas (Shortle, Thompson, Gross, & Harris, 2018).

Teorema 1.1. - Ley de Little: si los límites  $\lambda$  y  $W$  en la figura 2.10 existen y son finitos, entonces existe el límite  $L$ .



$$L = \lambda W$$

*Ecuación 2.5*



*Figura 2.10. Marco genérico para la Ley de Little*

Primero, el teorema 1.1 es una declaración sobre promedios de largo plazo. Es decir, las cantidades  $L$ ,  $\lambda$  y  $W$  están definidas como límites infinitos. Los resultados se expresan utilizando un promedio infinito de largo plazo, por lo que la Ley de Little proporciona una relación necesaria en la separación de esta teoría (Shortle, Thompson, Gross, & Harris, 2018).

Segundo, el teorema 1.1 requiere que los límites para  $\lambda$  y  $W$  existan. Esto excluye escenarios en los que el tiempo en el sistema crece sin límite. Esto ocurre en una cola inestable donde la tasa de llegada excede la tasa máxima de servicio, por lo que el tamaño de la cola (y por lo tanto el tiempo en el sistema) crece sin límite con el tiempo.

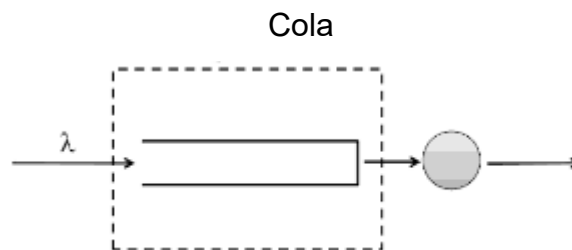
Tercero, el teorema no requiere técnicamente la existencia de una "cola". Más bien, requiere la existencia de un "sistema" al que llegan las entidades y de donde salen. El sistema puede considerarse como una caja negra, aparte de la existencia de límites apropiados como se indicó anteriormente. Existen diferentes disciplinas de atención, no es obligatorio que las entidades salgan en el orden en que llegan. No hay ningún requisito de llegadas de Poisson, servicio exponencial o disciplina de servicio de FCFS (supuestos comunes a lo largo del texto). El principal requisito es que las entidades se retiren después de que llegan (es decir,  $W^{(k)} \geq 0$ ).





Según cómo se defina el "sistema", se pueden derivar diferentes relaciones de la Ley de Little. En este sentido, la Ley de Little puede considerarse como un principio, más que como una ecuación fija. En particular, para un sistema de colas dado, las cantidades  $L$ ,  $\lambda$  y  $W$  pueden tomar diferentes significados dependiendo de cómo se define el sistema con respecto a la cola (Shortle, Thompson, Gross, & Harris, 2018).

Un "sistema de espera" consiste en objetos discretos que llamaremos "elementos" que "llegan" a cierta velocidad al "sistema". Dentro del sistema, los elementos pueden formar una o más colas y eventualmente recibir "servicio" y salir. La figura 2.11 muestra esto esquemáticamente.



*Figura 2.11. Ley de Little aplicada a la teoría de colas*

Mientras que los elementos están en el sistema, pueden estar en colas, o pueden estar en servicio o algunos en cola y otros en servicio. La interpretación dependerá de la aplicación y los objetivos del modelador (Little, 2011).

### **2.11.1. Ley de Little en la Administración de Operaciones (AO)**

La Administración de Operaciones cubre una gran área de práctica, principalmente para apoyar la toma de decisiones. La teoría de colas y la AO generalmente usan diferentes notaciones para los parámetros de la Ley de Little, por lo que en la tabla 2.4 se expresan las notaciones de uso más común.



---

*Tabla 2.4. Resumen de notación*

---

**Teoría de colas:  $L = \lambda W$**

$L$	Número promedio de artículos en el sistema (artículos)
$\lambda$	Tasa de llegada promedio de artículos al sistema (artículos/unidad de tiempo)
$W$	Espera promedio en el sistema (unidades de tiempo/artículo)

**Administración de operaciones  $TH = WIP / TC$  (Hopp & Spearman, 2011)**

$TH$	Rendimiento (artículos/unidad de tiempo)
$WIP$	Trabajo en proceso (artículos)
$TC$	Tiempo de ciclo (unidades de tiempo/artículo)

**Administración de operaciones (Cachon & Terwiesch, 2004)**

Inventario promedio = Velocidad de flujo promedio x Tiempo de flujo promedio, donde se elige la unidad de flujo para adaptarse a la aplicación (artículo, cliente, vehículo, widget...), por lo que las dimensiones de los términos en la ecuación de la Ley de Little son:

Inventario promedio (unidades de flujo)

Velocidad de flujo promedio (unidades de flujo/unidad de tiempo)

Tiempo de flujo promedio (unidades de tiempo/unidad de flujo)

---

Cuando se quiere evaluar el desempeño de un sistema en términos de su capacidad se utiliza la Ley de Little que es la relación fundamental entre las medidas de desempeño básicas de un proceso en estado estable (Hopp & Spearman, 2011).

- Trabajo en proceso o inventario (WIP): cantidad total de entidades presentes en el proceso. La dinámica del inventario se determina por la diferencia de tasas de entrada y salida de entidades en el proceso en un periodo dado, se ilustra su formulación en la ecuación 2.6.

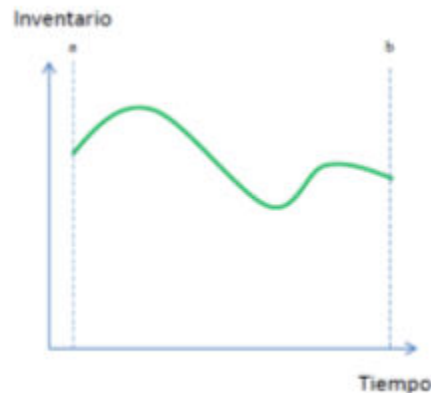


- Tiempo de ciclo (TC): tiempo total que una entidad permanece dentro de un proceso.
- Rendimiento (TH): cantidad de entidades promedio que fluyen en el proceso por unidad de tiempo (en estado estable).

$$WIP = TC \times TH$$

*Ecuación 2.6*

Se debe tener en cuenta de que esta relación solo se puede ser calculada en estado estable: cuando la tasa promedio de flujo de entrada de entidades al proceso es igual a la tasa promedio de salida de entidades del proceso (figura 2.7). El inventario en estado estable se puede calcular con la ayuda de la definición de la ecuación 2.7.



Fuente: basado en Muñoz , 2015

*Figura 2.12. Ejemplo de comportamiento de un inventario*

$$I = \frac{1}{b-a} \int_{t=a}^{t=b} I_t dt$$

*Ecuación 2.7*

Fuente: basado en Muñoz , 2015



### Implicaciones de la Ley de Little:

- Sólo se requieren dos medidas clave de desempeño del proceso para hallar la tercera (en este caso de estudio es el tiempo de ciclo y tamaño de carga).
- Para un nivel de rendimiento requerido, la única forma de reducir inventarios es reducir el tiempo de ciclo.
- Un sistema que está diseñado para cumplir con un determinado rendimiento, siempre debe tener inventario (Hopp & Spearman, 2011).

#### **2.11.2. La Administración de Operaciones tiene una orientación diferente de la Teoría de Colas**

Little & Graves (2008) hacen algunas observaciones acerca de la teoría de la Administración de Operaciones en comparación con la teoría de colas: Es fácil ver que  $TH = WIP / TC$  es equivalente a  $\lambda = L / W$ . Sin embargo, existe una diferencia más fundamental: en cuanto a AO, la ley se establece en términos de la producción promedio o tasa de salida o flujo del sistema, en lugar de la tasa de llegada. Esto refleja la perspectiva de un gerente operativo típico, especialmente en manufactura. La producción es el enfoque principal, porque nominalmente es su razón de ser.

Como se indica en  $TH = WIP / TC$ , vemos que cualquier aumento en la producción requiere un aumento en el inventario de trabajo en proceso o una reducción en el tiempo del ciclo o ambos, a menos que se realice algún cambio en el proceso de fabricación. Además, en muchos contextos, la tasa de salida se determina de forma exógena y se asigna al sistema de fabricación; refleja pedidos, ventas reales y/o un pronóstico de ventas. El sistema de fabricación debe entonces administrar sus operaciones para lograr esta tasa. Tendrá que determinar cómo liberar trabajo a la operación para cumplir con el resultado deseado.



En efecto, el proceso de llegada es endógeno. El gerente de operaciones decide las llegadas en función de los resultados deseados. Hay una extensa investigación en la literatura de operaciones sobre la mejor manera de establecer la liberación del trabajo (o el proceso de llegada) para lograr los objetivos de salida. Las mejores políticas son dinámicas y dependen del estado del taller de fabricación, por ejemplo, dependen del trabajo en proceso (Little, 2011).

## **2.12. Manufactura Esbelta**

La Manufactura Esbelta ha sido definida como un "sistema para la identificación y eliminación del desperdicio y las actividades de no-valor agregado, a través de la mejora continua, con el afán de alcanzar la perfección deseada del cliente". Actualmente se le reconoce mediante diferentes nombres, tales como; Sistema de Producción Toyota, Producción Justo a Tiempo, entre otros. El objetivo deseado en este sistema es eliminar los desperdicios de sobreproducción, controlar los niveles de inventario, disminuir los tiempos de espera, reducir los tiempos muertos, optimizar la transportación, reducir defectos y procesos extras (figura 2.12). En la Manufactura Esbelta es de suma importancia la identificación de las actividades de no-valor agregado y que al mismo tiempo contribuyen a obtener una pobre calidad en los productos (Peterman, 2001).

Para entender Manufactura Esbelta es necesario comprender que se enfoca en cómo pensamos en el proceso de manufactura. Es la codificación de un conjunto de ideas que trabajan en armonía, identificando a los clientes y cómo ellos definen el valor. Permite a las compañías y a las personas enfocar los recursos en añadir valor. Producir lo que el cliente demanda incluye el correcto nivel de calidad y características. La meta de una organización esbelta es poder entregar el producto exacto en la exacta cantidad con la calidad exacta que los clientes requieren y exactamente cuando ellos lo necesitan (Becker, 2001).

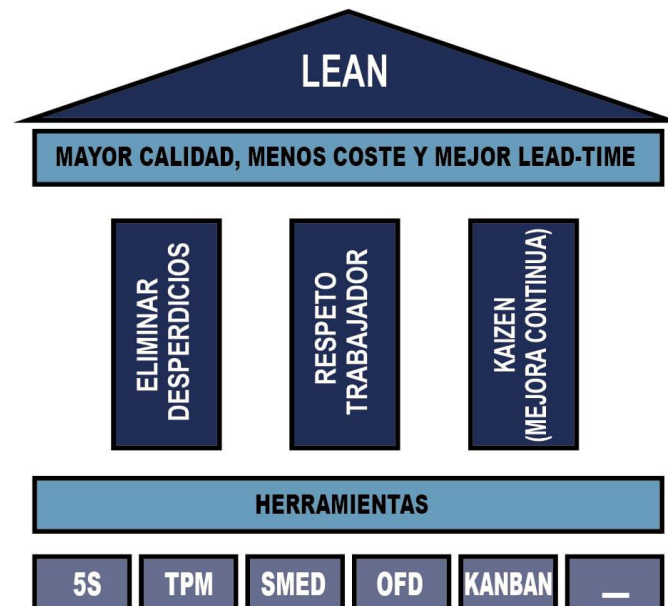


Figura 2.13. Filosofía Manufactura Esbelta

Uno de los obstáculos de la manufactura esbelta es entender el concepto de desperdicio. En cualquier ambiente de manufactura todos trabajan para minimizar el desperdicio. Sin embargo, la manufactura esbelta define este esquema con otra visión. Tradicionalmente el desperdicio ha sido visto como un objeto. Es muy fácil guardar un recipiente e identificarlo como desperdicio. En la manufactura esbelta, el término desperdicio no solo se refiere al material físico sino más bien a la relación existente entre el recurso y el consumidor final. Por regla general, si el consumidor final no paga por algo, entonces se considera como desperdicio.

Uno de los íconos de calidad de las compañías que son realmente esbeltas es el enfoque en el mejoramiento continuo. Si bien los cambios basados en proyectos son más generalizados, la manufactura esbelta lleva en sí mismo al cambio constante. Al ser la manufactura esbelta capaz de identificar y eliminar los desperdicios de los procesos se llega a conseguir beneficios en un corto tiempo (Becker, 2001).



### **2.12.1. Los siete desperdicios**

Desperdicio o muda "su significado en japonés", es sencillamente una actividad que no agrega valor. Trabajo es una serie de procesos o pasos, empezando con la materia prima hasta la salida del producto o servicio. Los recursos de cada proceso ya sean personas o máquinas, agregan o no un valor, por lo que el desperdicio se clasifica en 7 categorías (Ohno,1988):

#### **1. Desperdicio por sobreproducción:**

El desperdicio por sobreproducción es provocado por la necesidad de seguridad; es común encontrar esta práctica en muchas empresas; esta falsa seguridad es creada cuando el personal decide trabajar y producir más de lo necesario para tener un inventario como base que puede ser empleado en caso de que algún problema futuro se presente en el proceso.

El desperdicio provocado por este evento es de los más grandes y provoca más pérdidas que beneficios, por ejemplo, se consumen los materiales antes de ser necesario, desperdicio de mano de obra y utilería, se tiene la necesidad de más espacio para almacenar el material por exceso de inventario, agrega transportación y costos de administración. La sobreproducción es una función equivocada de los supervisores resultado de una mentalidad anticuada.

#### **2. Desperdicio por inventario:**

Se conoce como inventario a todos aquellos productos que forman parte del proceso, ya sean: productos terminados, productos en proceso y partes o materia prima almacenada. El desperdicio por inventario radica en que esté no agrega valor a los productos o servicios, por lo contrario, esto agrega costos de operación y aumenta el espacio necesario para poder almacenar este inventario.



### 3. Desperdicio por rechazos / retrabajo:

Los productos defectuosos además de interrumpir la producción causan retrabajo; provocando desperdicio por atender máquinas, papelería, trato con los clientes inconformes, cambios en el diseño y en el proceso.

### 4. Desperdicio por movimientos:

El desperdicio por movimientos se considera cuando algún movimiento realizado por el operador/persona no agrega valor al producto/servicio o es improductivo. Este tipo de desperdicio es muy común encontrarlo dentro de las operaciones de las empresas, sin embargo, se consideran como parte habitual del trabajo o del proceso en sí.

### 5. Desperdicio por proceso:

El desperdicio por proceso se conoce como aquellas actividades que se realizan en cada paso del proceso y no dan un valor agregado al producto/servicio; esto puede ser debido a tecnología inapropiada o un mal diseño del proceso.

### 6. Desperdicio por tiempo en espera:

Este tipo de desperdicio es muy fácil de detectar y es considerado cuando las manos del operador/persona están ociosas, debido a un desbalance entre las actividades del proceso, falta de partes/trabajo, tiempos de preparación o por simple monitoreo.

### 7. Desperdicio por transportación:

La transportación es una parte esencial en el proceso, pero está no agrega ningún valor al producto, por lo contrario, el exceso o una mala transportación puede dañar al producto.





## 2.12.2. Herramientas y técnicas en la Manufactura Esbelta

La Manufactura Esbelta es una filosofía de mejora continua que agrupa una extensa colección de diferentes herramientas y conceptos, tales como la Comunicación Visual y los dos pilares del Sistema de Producción Toyota (TPS) Justo a Tiempo y Automatización. Estas herramientas permiten a las compañías eliminar los desperdicios en todas las áreas, reducir sus costos, mejorar los procesos, aumentar la satisfacción de los clientes y mantener el margen de utilidad (Ohno, 1988).

Comunicación visual. - La característica distintiva de la comunicación visual en las fábricas es el modo en el que se organiza la información para que sea accesible. El aspecto distintivo de la comunicación visual es su enfoque hacia el grupo, no justamente hacia el individuo. No obstante, la comprensión ni está limitada por las posiciones jerárquicas o por las capacidades especializadas, sino por la pertenencia a una comunidad cultural específica. Esta es una de las diferencias fundamentales de la comunicación visual. La meta en estas fábricas es ampliar la comunidad para aumentar la gama de información al mayor número de personas.

Cuando las personas no están involucradas, pueden siempre pensar que la información se refiere a sus colegas, supervisores, personal de control de calidad, técnicos, o directivos y que no hay mensajes que le afecten directamente. Un lugar con comunicación visual está dotado con una estructura de comunicación cuya naturaleza es permitir que se vea todo lo que tenga significado y de proveer significado para todo lo que pueda verse (Greif, 1994).

Justo a tiempo (JIT). - Es mucho más que un sistema de reducción de inventarios, es mucho más que reducir los tiempos de preparación. Es mucho más que utilizar Kanban o Jidoka. Es mucho más que modernizar la empresa con tecnología sofisticada. JIT es hacer que una compañía opere como el cuerpo humano opera para un individuo (Ohno, 1988).



Automatización. - El objetivo primordial del Sistema de producción Toyota es la eliminación del desperdicio como actividades que no agregan valor al producto o servicio. El mantener a un operador observando una máquina trabajando es contradictorio al sistema en sí, para lo cual, existe una herramienta que se conoce como automatización que significa construir un mecanismo para prevenir la producción de trabajo defectuoso en máquinas o productos es decir crear "máquinas inteligentes". Cuando sucede una condición anormal, como defectos, herramientas dañadas, escasez de materia prima, la máquina puede detectar esta anomalía, parar la operación y mandar alguna señal de ayuda al operador o técnico para que tome alguna acción apropiada (Balakrishnan, 2001).

### **2.13. Definición de simulación**

Se ha empezado a utilizar la palabra simulación sin haber dado previamente una definición de ella. Por consiguiente, antes de proseguir con la discusión de este tema, sería conveniente describir algunas de las definiciones más aceptadas y difundidas de la palabra simulación (Coss, 2003).

Thomas H. Naylor la define así:

*"Simulación es una técnica numérica para conducir experimentos en una computadora digital. Estos experimentos comprenden ciertos tipos de relaciones matemáticas y lógicas, las cuales son necesarias para describir el comportamiento y la estructura de sistemas complejos del mundo real a través de largos períodos de tiempo".*

La definición anterior está en un sentido muy amplio, pues puede incluir desde una maqueta, hasta un sofisticado programa de computadora.



En sentido más estricto, H. Maisel y H. Gnugnoli, definen simulación como:

*“Simulación es una técnica numérica para realizar experimentos en una computadora digital. Estos experimentos involucran ciertos tipos de modelos matemáticos y lógicos que describen el comportamiento de sistemas de negocios, económicos, sociales, biológicos, físicos o químicos a través de largos períodos de tiempo”.*

Otros estudiosos del tema como Shannon, definen simulación como:

*“Simulación es 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 y evaluar varias estrategias con las cuáles se puede operar el sistema”.*

Zeigler (1976) ofrece su propio significado, afirmando que la simulación no es más que una imitación de la experiencia real, que además puede ser representando de manera virtual posibilitando las respuestas a los interrogantes planteados sobre el sistema en estudio. Un concepto más sistemático es aquel que señala Fishwick (1995), describiendo la simulación como el proceso inmutablemente asociado y repetitivo a tres componentes: diseño, ejecución y análisis de ejecución.

### **2.13.1. Simulación como herramienta de ingeniería**

De acuerdo a las apreciaciones de García, García, & Cárdenas (2012), la simulación es una solución a la necesidad actual de entender a fondo los complejos sistemas productivos, poder entender y analizar diferentes escenarios con múltiples variables de decisión y tener la posibilidad de ver sus comportamientos a través del tiempo.



Además, abre la posibilidad de probar un sin número de modificaciones en un proceso productivo sin tener que invertir en adecuaciones ni cambio de personal, o desarrollar un trabajo mecánico y ver su resultado sin necesidad de gastar algún material y tener que desperdiciarlo, en conclusión, la simulación es una herramienta para probar mejoras a muy bajo costo y evitar inversiones que puedan ser perdidas.

Se define la simulación de eventos discretos como “el conjunto de relaciones lógicas, matemáticas y probabilísticas que integran el comportamiento de un sistema bajo estudio cuando se presenta un evento determinado”. Dentro de las ventajas de la simulación se encuentran las siguientes:

- ✓ Permite conocer el impacto de los cambios en los procesos sin necesidad de llevarlos a cabo en la realidad.
- ✓ Puede utilizarse como medio de capacitación en la toma de decisiones.
- ✓ Es más económico realizar cambios en el software de simulación que en el proceso real.
- ✓ Permite probar varios escenarios para encontrar el mejor.

Las desventajas más considerables de la simulación son:

- ✗ La simulación ayuda a obtener el mejor escenario de los propuestos, pero no es una herramienta para optimizar.
- ✗ Es una herramienta que debe utilizarse en sistemas de cierta complejidad, en ocasiones para problemas sencillos utilizar la simulación puede requerir equipo costoso y puede tardar mucho tiempo para desarrollarse.

No siempre los conocimientos en estos paquetes son comunes ni suficientes, así como en estadística (García, García, & Cárdenas, 2012).



### **2.13.2. Mejoramiento de procesos**

El mejoramiento de los procesos es el estudio sistemático de las actividades y flujos de cada proceso a fin de mejorarlo. Su propósito es “aprender las cifras”, entender el proceso y desentrañar los detalles. Una vez que se ha comprendido realmente un proceso, es posible mejorarlo. Tiene como objetivo final racionalizar tareas, suprimir materiales innecesarios o servicios costosos y que no agregan valor final y mejorar el entorno de trabajo. El mejoramiento de procesos consta varias etapas, es importante que la mejora propuesta sea probada para asegurar la mejora en el proceso y que dicha mejora quede debidamente documentada. A continuación, se describen las etapas (Krajewski, Ritzman, Malhotra, Villareal, & del Pilartr, 2008):

Identificar oportunidades. - Para desarrollar esta etapa se deben analizar los cuatro procesos que dan valor a los clientes externos, como lo son: relaciones con proveedores, desarrollo de nuevos servicios y productos, surtido de pedidos y relaciones con los clientes. Se debe analizar si estos están satisfaciendo las necesidades de los clientes y alentar a todos los involucrados en los procesos a generar nuevas ideas para mejorarlos.

Definir el alcance: Limitar el proceso a mejorar, para saber cantidad de personal a asignar y recursos, tener en cuenta si es un proceso general o un subproceso pequeño.

Documentar el proceso: Realizar una lista con los insumos, proveedores, productos y clientes (tanto internos como externos) del proceso. Esta información puede ser presentada en diagramas para hacer más fácil su entendimiento.

Evaluar el desempeño: Antes de realizar la evaluación. Se debe asegurar que el método de evaluación y la medida es correcta y el proceso va ser medido correctamente, esto puede hacer preguntándole al operario que lo realiza por la forma correcta y observando como este lo realiza. Al finalizar de este punto debe tenerse un estudio de tiempos o algo semejante.



Rediseño del proceso: Una vez analizado el proceso y el desempeño obtenido, se pasa a buscar las brechas entre lo esperado y lo obtenido y con base a esto empezar a buscar mejoras, una forma de encontrarlas es buscando sus causas iniciales.

## 2.15. 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 2.13).

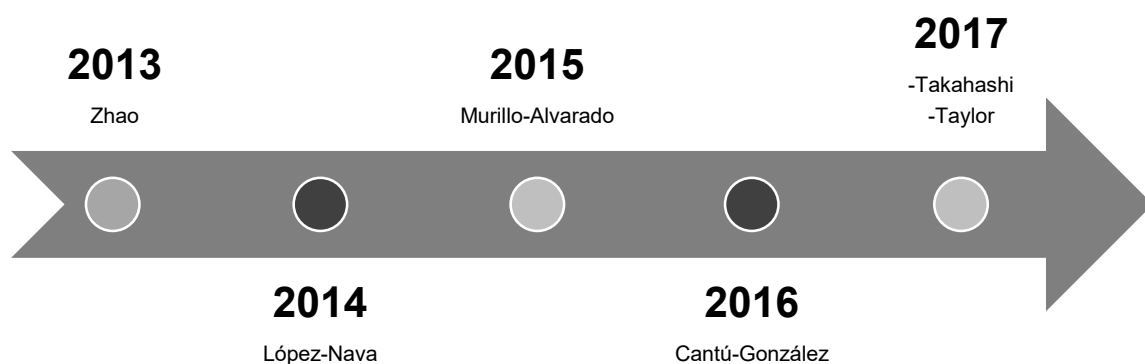


Figura 2.14. Estado del arte

Zhao, Ichimura, & Takakuwa (2013) 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, Martínez, Cavazos, & Mayett (2014) 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, y otros (2015) 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, que considere 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, Guardado, & Balderas (2016) 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, Anagnostou, Bell, Kite, & Pattison (2017) 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 & Tanaka (2017) 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.





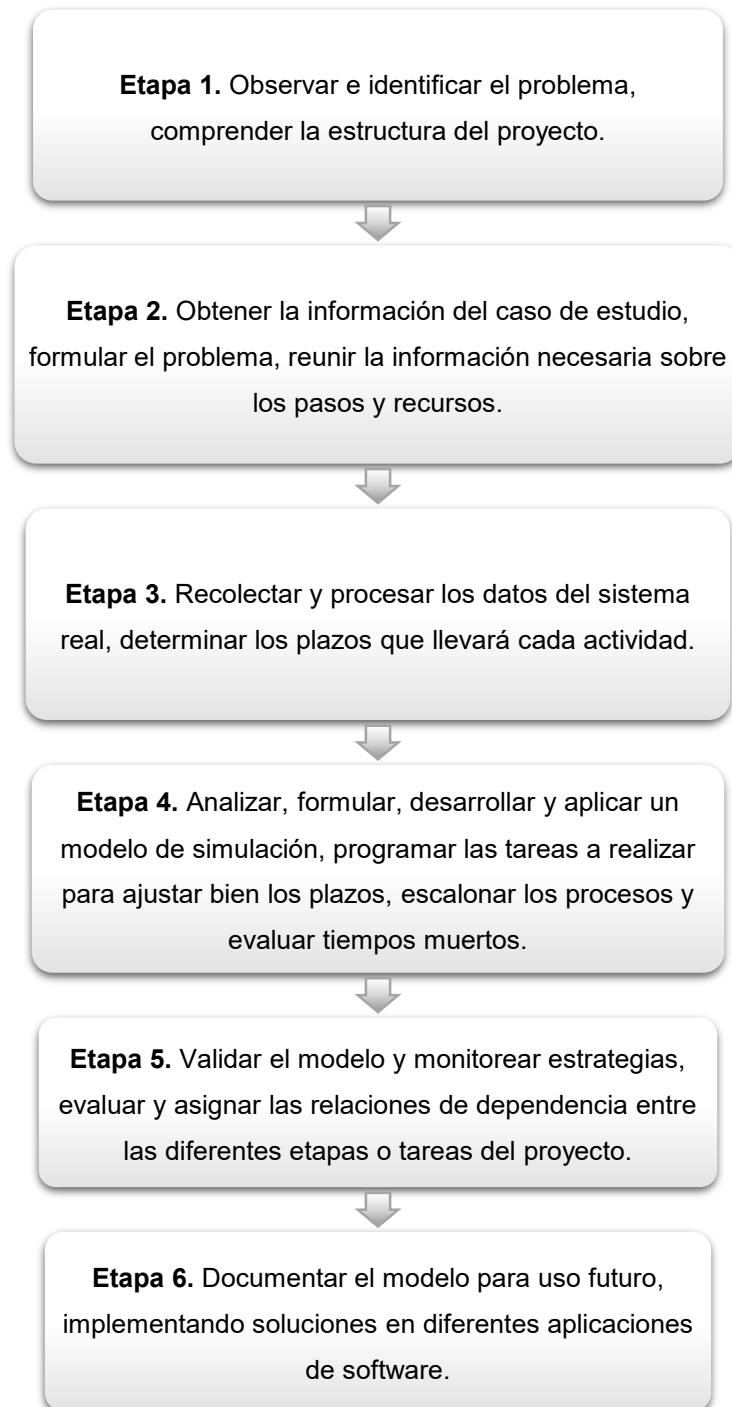
## **CAPÍTULO III: METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN**

### **3.1. Descripción del método de investigación**

Hablar de un modelo de simulación implica entender que se refiere 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. 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. La presente investigación se desarrollará en 6 etapas, la figura 3.1 muestra las etapas planteadas del método de investigación de la presente tesis:



*Figura 3.1. Diagrama del método de investigación*



### **3.1.1. 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.

### **3.1.2. Etapa 2. Obtener la información del caso de estudio**

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.

### **3.1.3. Etapa 2. 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 destilación es bombeado el área de almacenes.

#### **3.1.4. Etapa 4. Analizar las variables, 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.



### **3.1.5. 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. 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.

### **3.1.6. Etapa 6. Documentar el modelo como uso futuro**

El desarrollo de este trabajo 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.



## CAPÍTULO IV: RESULTADOS Y CONCLUSIONES

### 4.1. Resultados del método de investigación

Para este caso de estudio, la metodología se pudo definir como la descripción, el análisis y la valoración crítica de cada una de las etapas antes mencionadas del método de investigación (figura 3.1). La metodología fue un instrumento que enlazó el sujeto con el objetivo de la investigación, debido a que, sin esta metodología no era posible llegar a la lógica que conduce al conocimiento científico. Por lo tanto, los métodos significaron el camino más adecuado para lograr un fin. Fue necesario aplicar el concepto de investigación científica, por que nos indicó la serie de pasos que conducen a la búsqueda de conocimientos mediante la aplicación de métodos y técnicas. Se logró esto, por que se utilizaron las siguientes bases de la investigación:

Exploratoria: fueron investigaciones donde se generó una visión general de tipo aproximativo respecto a una determinada realidad. Este tipo de investigación se realizó especialmente por que el tema elegido ha sido poco explorado y reconocido, de esta manera es difícil formular hipótesis precisas o de cierta generalidad, además, cuando los recursos que se tenían disponibles resultaron insuficientes como para emprender un trabajo más profundo.

Descriptivas: la preocupación primordial radicó en describir algunas características fundamentales de conjuntos homogéneos de fenómenos, utilizando criterios sistemáticos que permitieran poner de manifiesto su estructura o comportamiento. De esta forma se obtuvieron las notas que caracterizan a la realidad estudiada.

Explicativas: fueron aquellos trabajos donde se mostró preocupación, por que se centró en determinar los orígenes o las causas de un determinado conjunto de fenómenos.



Donde el objetivo fue conocer por que suceden ciertos hechos atrás ves de la delimitación de las relaciones causales existentes o, al menos, de las condiciones en que ellas producen. Este es el tipo de investigación que mas profundiza nuestro conocimiento de la realidad, porque nos explicó la razón, el por qué de las cosas, y es por lo tanto más complejo y delicado pues el riesgo de cometer errores aumentó considerablemente.

#### 4.1.1. Resultados de la definición del problema y los requerimientos

Se identificó que, no es suficiente expresar el problema en términos generales, porque en la medida en que el problema se estuvo formulando de una manera más precisa, la construcción del modelo fue más sencilla. Al inicio, se observó que es importante definir el problema entendiendo su contexto (figura 4.1), identificando los objetivos que definen la razón y el propósito para llevar a cabo el proyecto de simulación.



Fuente: elaboración propia

Figura 4.1. Diagrama del proceso de fabricación del mezcal



De acuerdo a lo que se mencionó en el párrafo anterior, fue necesario generar un diagrama de flujo para poder observar los pasos que se siguen desde que la materia prima (agave) entra al sistema hasta que sale, asimismo ver qué pasos se realizan dependiendo de cada etapa y/o actividad que se hace por lote o carga de materia prima y así poder tener una mejor recolección de datos. En la tabla 4.1, el diagrama de flujo muestra los pasos a seguir en la línea de producción, este se construyó llevando una secuencia cronológica y describiendo con exactitud el proceso, identificando las actividades principales; ya por ultimo después de este paso solo fue cuestión de recrearlo en el simulador lo mejor posible para que arrojara resultados, los más cercanos a la realidad y así poder identificar los cambios que podamos realizar para que este sea una línea de producción de Mezcal eficaz y eficiente.

*Tabla 4.1. Diagrama de flujo del proceso de elaboración de mezcal*

<input type="radio"/> Prototipo <input type="radio"/> Prelanzamiento <input checked="" type="radio"/> Producción <input type="radio"/> Solo servicio									
Operación	Preparar	Operación	Inspección	Decisión	No conforme	Mover	Almacenar	Proceso, Resultado Final o Característica de Inspección	Proceso, Resultado Final o Característica de Inspección
1	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Negociación, corte, jima y transporte de materia prima	-
2	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Recibir materia prima en el patio de maniobras de acuerdo a la programación	Disponibilidad de inventario de materia prima
3	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Realizar pesaje	Lotificación y programación de número cargas a procesar
4	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Realizar corte de materia prima para procesar	Reducción de tamaño para facilitar el acomodo en el horno
5	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Transportar materia prima troceada al área de cocción	-
6	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Cargar el horno y realizar cocción de materia prima	Se lleva acabo un proceso bioquímico
7	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Eliminar mieles amargas durante la cocción	Retirar desechos
8	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Recolectar mieles dulces al finalizar la cocción	Recuperación
9	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Descargar horno	-
10	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Realizar desgarre y molienda	Facilita la extracción del jugo
11	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Filtrar y colectar el jugo concentrado	-
12	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Ajustar concentración de azucres del jugo en una tina	Se adiciona agua
13	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	El mosto se envía al área de fermentación	Proceso bioquímico, conversión de azucres en alcohol
14	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Cargar torre de destilación y destilar el primer lote	-
15	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Cargar tanque pulmón con el segundo lote	-
16	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Cargar torre de destilación y destilar el segundo lote	-
17	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Almacenar el producto terminado y ajustar graduación alcohólica	Resguardo de producto
18	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Producto joven o madurado	-
19	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Certificar el producto	Análisis para verificar calidad
20	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Envasar el producto	-
21	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Venta de producto terminado	Comercialización

Fuente: elaboración propia





Una forma de conocer el problema, es que se tenía que saber más sobre el sistema que se estaba investigando; por ejemplo, su capacidad actual de producción, las medidas de desempeño actuales del sistema (utilización, tiempo de ciclo, tiempo de espera, entre otros); conocer cuáles son las restricciones o “cuellos de botella” y ver la factibilidad de alcanzar indicadores meta de desempeño (adición de recursos, mejorar métodos, etcétera); qué variables de decisión son más sensibles en el desempeño global del sistema. El objetivo de la simulación debía ser realista y factible de ser ejecutado, y sus requerimientos deben definirse en términos de recursos, tiempo y presupuesto.

#### **4.1.2. Resultados del diseño del modelo conceptual**

Como primer punto a revisar, se generó un Diagrama de Gantt con apoyo de una hoja de cálculo de Excel. 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 4.2).

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.

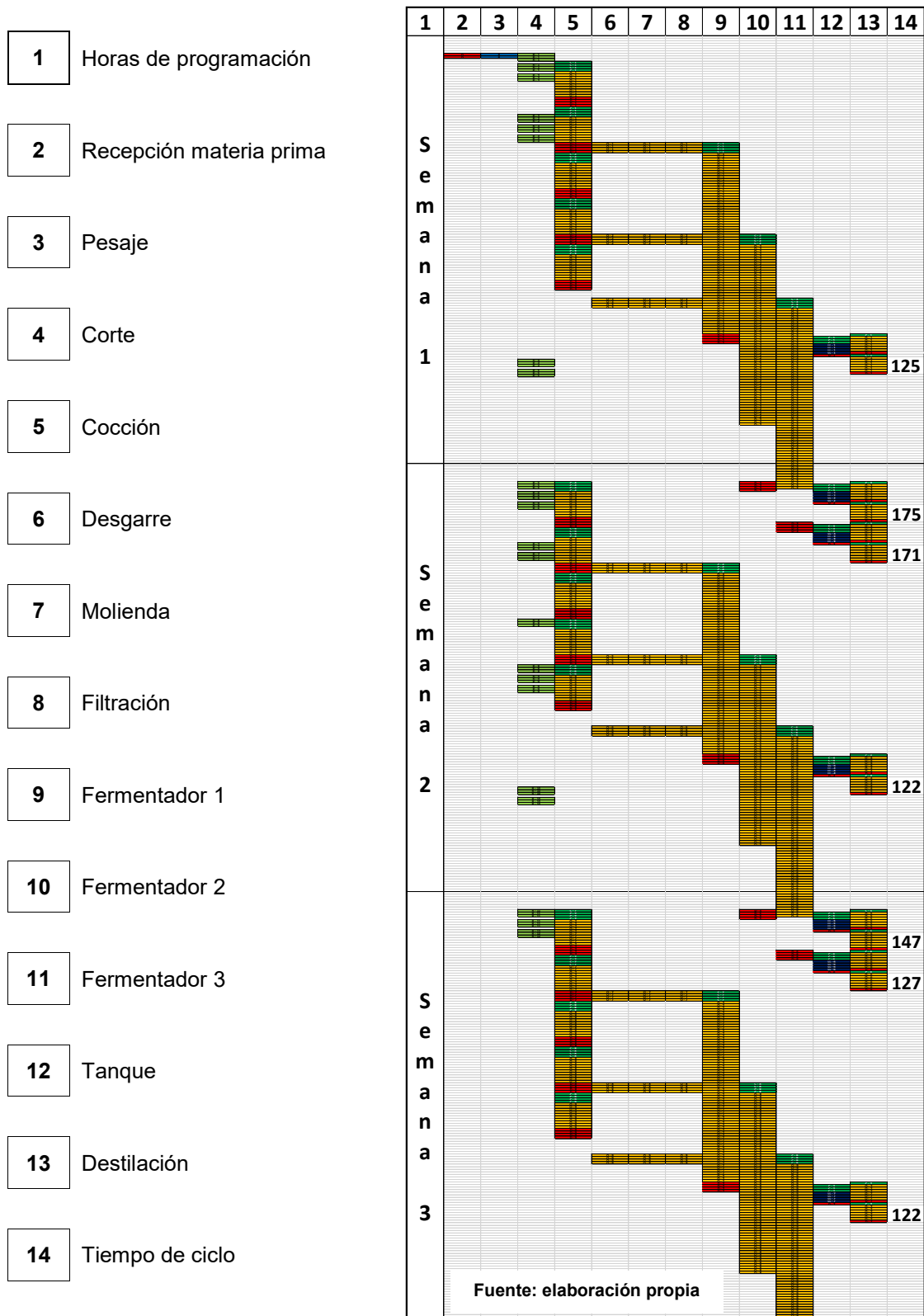


Figura 4.2. Representación de la planificación mediante un Diagrama de Gantt



La metodología utilizada en este trabajo 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.

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 4.3 se estimaron en forma cuantitativa. Para obtener estos datos fue necesario evaluar 24 corridas, equivalentes a 1383 horas de proceso continuo.

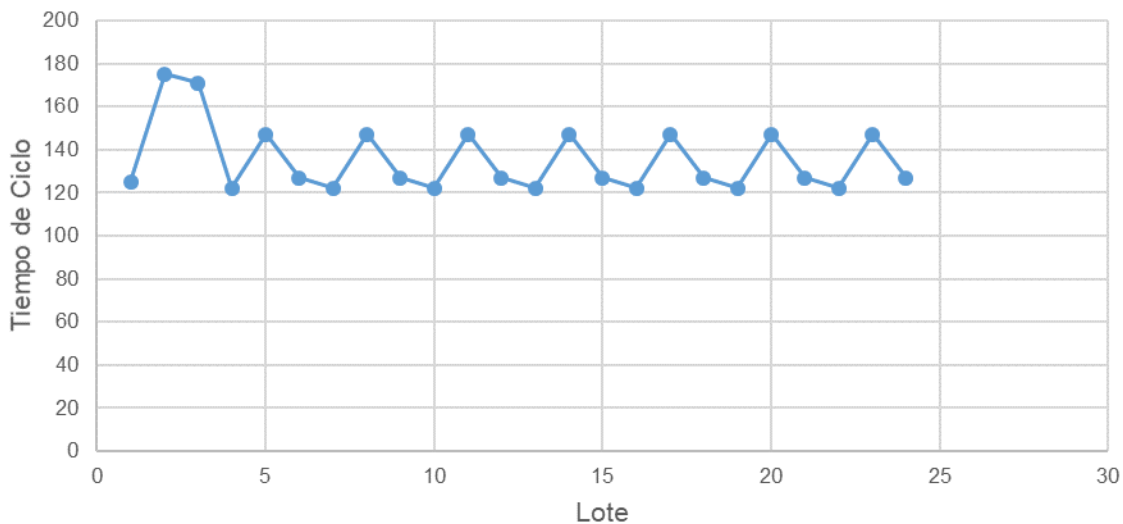


Figura 4.3. Tiempo de ciclo en el proceso de producción mezcal



### 4.1.3. Resultados de la obtención y análisis estadístico de datos

Se realizó un levantamiento de datos en la planta productora de mezcal ubicada en San Felipe, Municipio del Estado de Guanajuato. Durante la recolección, se identificaron como necesarios los siguientes puntos, número de entradas al sistema, tiempos entre entradas, operaciones, frecuencias entre operaciones y comportamiento del sistema. Para su estudio, interpretación y/o manejo, el campo de la estadística provee principios y métodos para recolectar, resumir y analizar datos, así como para interpretar los resultados. Los valores estadísticos se utilizaron para describir los datos y hacer inferencias (Tabla 4.2).

*Tabla 4.2. Análisis estadístico descriptivo de los datos recolectados*

ETAPA / ACTIVIDAD	TIEMPO DE CICLO				ENTRAS / SALIDAS				
	Promedio	Desviación Estandar	Unidades	C	Promedio	Desviación Estandar	Unidades	C	
Recepción de materia prima	34.17	7.07	min	0.21	Capacidad máxima 26,000		Kg	NA	
	0.57	0.12	Hr						
Pesaje	103.60	10.48	min	0.10	751.27	6.26	Kg	0.01	
	1.73	0.17	Hr						
Corte	197.73	33.79	min	0.17	718.14	6.56	Kg	0.01	
	3.30	0.56	Hr						
Cocción	658.10	9.86	min	0.01	718.14	6.56	Kg	0.01	
	10.91	0.16	Hr						
Desgarre	189.33	6.33	min	0.03	479.71	12.63	Kg	0.03	
	3.16	0.11	Hr						
Molienda / Filtración	159.93	6.07	min	0.04	482.83	12.37	lt	0.03	
	2.67	0.10	Hr		830.43	12.93	lt	0.02	
Fermentación	4558.80	191.29	min	0.04	830.43	12.93	lt	0.02	
	75.98	3.19	Hr						
Tanque	-	-	min	-	415.22	6.47	lt	0.02	
	-	-	Hr	-					
Destilación	Lote 1	416.80	29.05	min	0.07	37.37	7.27	lt	0.19
		6.95	0.48	Hr					
	Lote 2	434.03	36.19	min	0.08	45.57	9.24	lt	0.20
		7.23	0.60	Hr					



Mediante el coeficiente de variación (C) fue posible comparar la dispersión entre dos poblaciones distintas e incluso, comparar la variación producto de dos variables diferentes, que pueden provenir de una misma población. El coeficiente de variación elimina la dimensionalidad de las variables y tiene en cuenta la proporción existente entre una medida de tendencia y la desviación típica o estándar (ecuación 4.1).

$$C = \frac{\sigma}{\mu} \quad \text{Ecuación 4.1}$$

Donde:

$C$  = Coeficiente de variación

$\sigma$  = Desviación estándar

$\mu$  = Media aritmética

Una vez obtenidos los datos del análisis descriptivo, la medición de la productividad puede ser bastante directa. El uso de un solo recurso de entrada para medir la productividad, como se muestra en este caso de estudio, se denomina productividad de un solo factor. No obstante, un panorama más amplio, y que sería de suma importancia analizar en futuros trabajos de investigación, es la productividad de múltiples factores, la cual incluye todos los insumos o entradas (por ejemplo, mano de obra, material, energía, capital, etcétera). La productividad de múltiples factores también se conoce como productividad de factor total. En este trabajo, la medición de la productividad se efectuó en medidas de entradas y salidas específicas, se calculó como se muestra a continuación en la ecuación 4.2.

$$\text{Rendimiento} = \frac{\text{Tamaño de carga (kg)}}{\text{Mezcal producido (lt)}}$$

*Ecuación 4.2*

$$= \frac{718.14}{82.94} = 8.66 \text{ kg/lt}$$



Fue necesario determinar un factor para calcular la razón de cambio en una etapa del sistema de producción de mezcal (ecuación 4.3), específicamente donde se presenta el cambio físico de los insumos o materia prima procesados (kilogramos de agave), siendo el resultado litros de mezcal producidos. Lo antes mencionado se debe a que el caso de estudio pertenece al rubro de la industria de la transformación.

$$\begin{aligned} \text{Factor de conversión} &= \frac{\mu_{\text{Litros mezcal producido}}}{\mu_{\text{Tamaño de Carga}}} \\ &= \frac{37.37 + 45.57}{718.14} = 0.12 \end{aligned}$$

Ecuación 4.3

Los estadísticos descriptivos arrojaron un resumen y la descripción de las características más importantes de los datos. Se utilizó una hoja de cálculo de Excel para mostrar estadísticos descriptivos que fueron de utilidad para determinar tiempos de ciclos, entradas y salidas; para cada etapa del proceso de producción de mezcal. Una vez realizado el muestreo, se hizo el análisis de los datos de acuerdo a la figura 4.4.

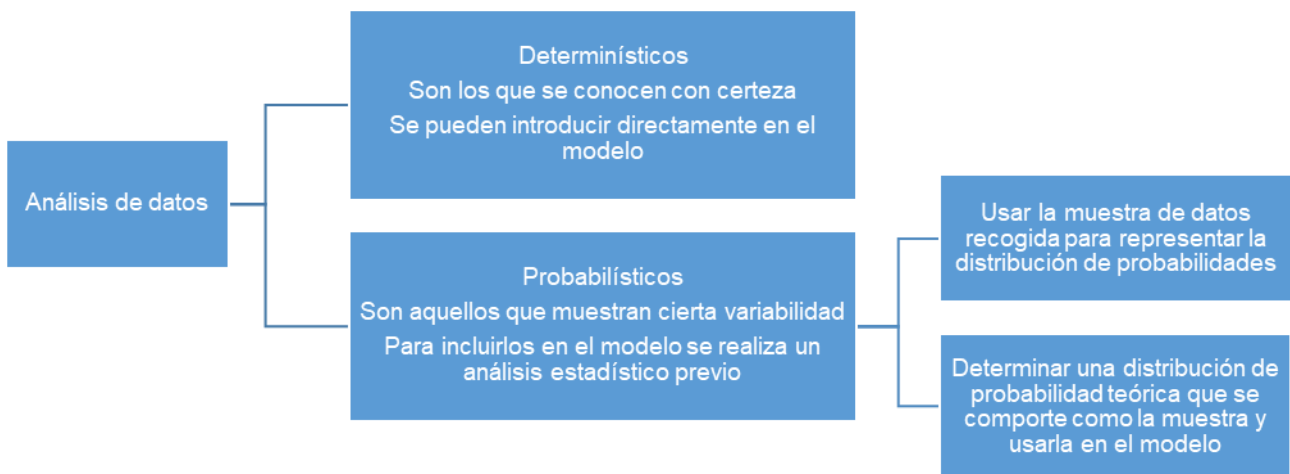


Figura 4.4. Análisis de datos



#### 4.1.4. Resultados del modelo actual del proceso de producción de mezcal

Para la aplicación del modelo base, se tomó la estructura del diagrama de flujo del proceso de producción de mezcal (tabla 4.1), para implementarlo en el simulador, y posteriormente se agregaron los tiempos en cada una de las actividades, los cuales aparecen en el apartado de los resultados de la obtención y análisis estadístico de datos, asimismo se estuvieron realizando algunas modificaciones para poder darle forma de acuerdo a las necesidades, de tal forma que los resultados que el sistema arrojó se apegaron a los datos que fueron recolectados, lo que permitió determinar si estos cumplen con lo esperado.

En la siguiente figura 4.5 se puede observar el diseño del modelo del proceso de producción de mezcal en el simulador, en donde se observa que es muy parecido al diagrama de flujo, como se mencionó en el párrafo anterior, solo con algunas modificaciones, lo que permitió observar cada una de las actividades que se realizan en el proceso de elaboración de mezcal.

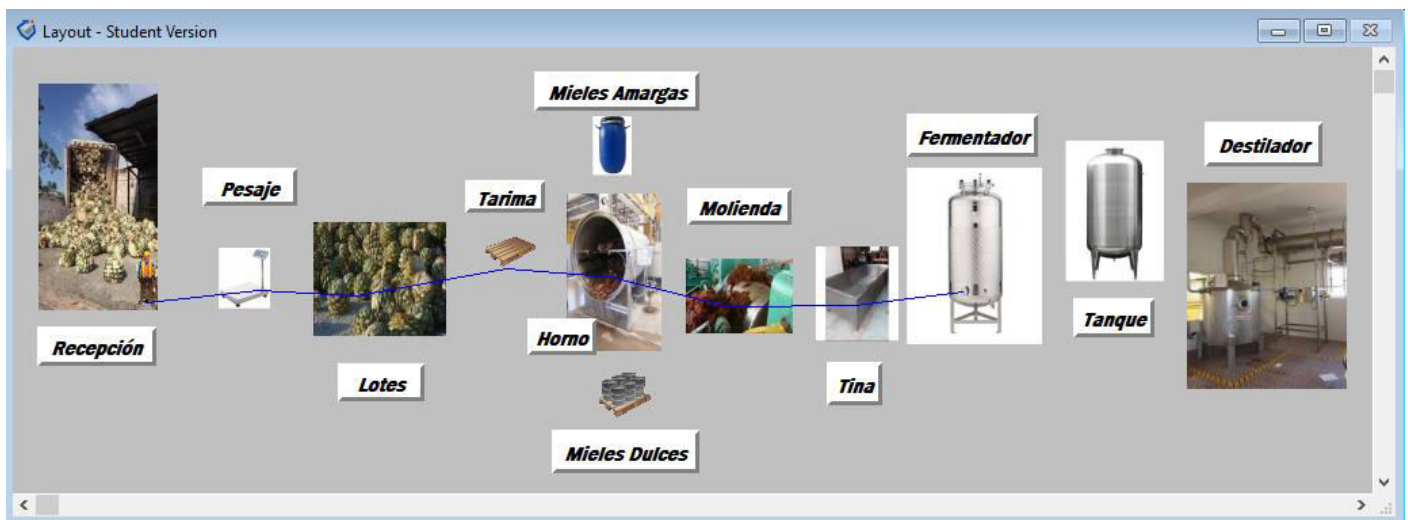


Figura 4.5. Diseño del modelo



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 4.6.

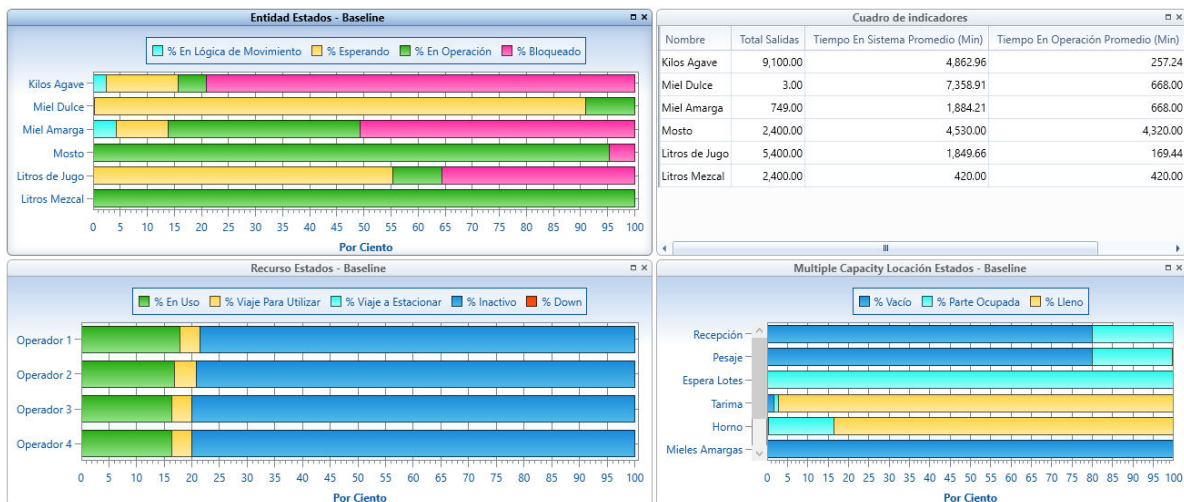


Figura 4.6. Reporte General del visor de salida de ProModel





En los resultados del modelo de simulación que representan la situación actual del proceso de producción de mezcal, 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 se resume en el reporte obtenido por el software ProModel, este análisis corresponde a los datos de la tabla 4.3 que se muestra a continuación.

*Tabla 4.3. 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 4.7 y 4.8, muestran 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.

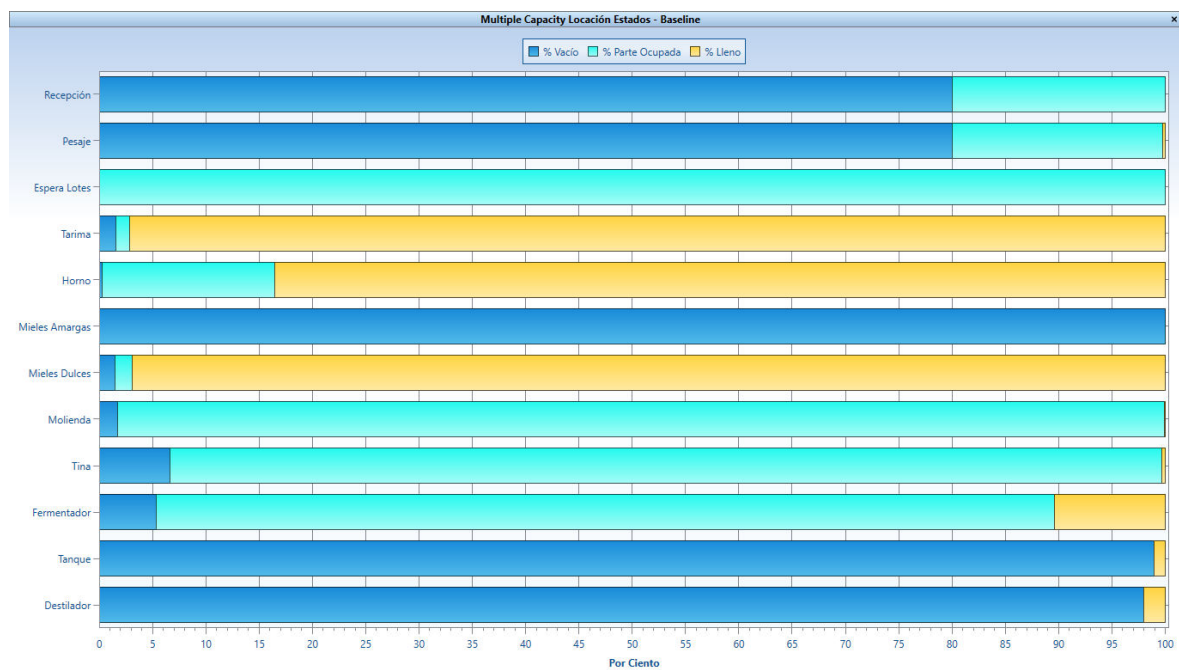


Figura 4.7. Corrida con número de entidades fijas (entrada de agave)

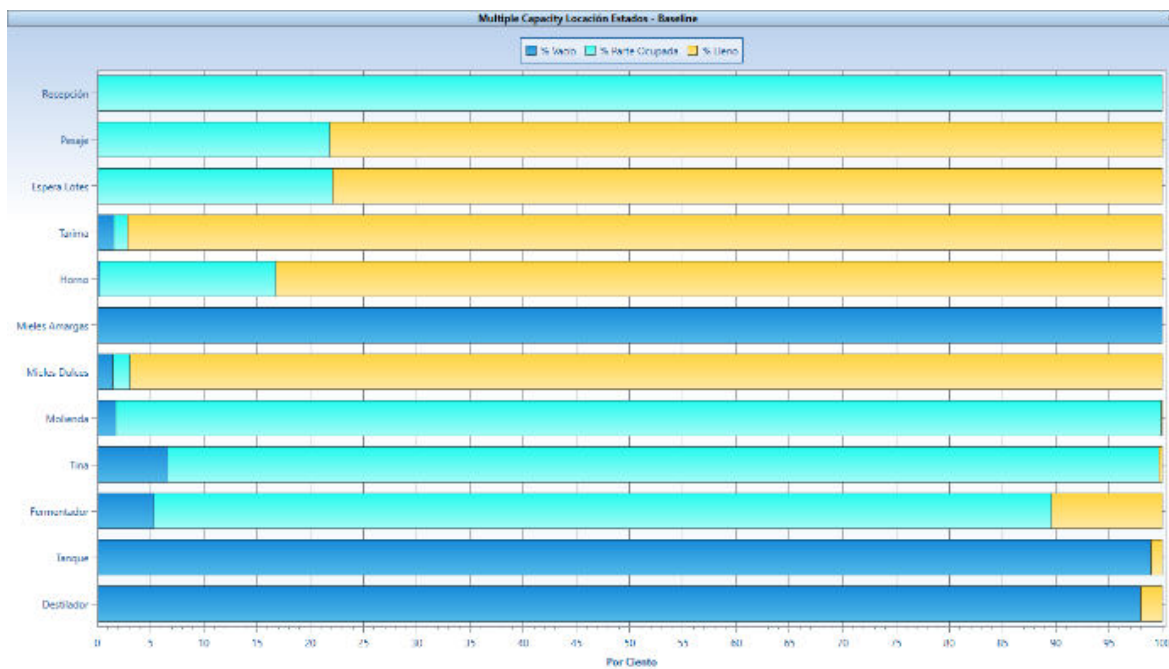


Figura 4.8. Corrida aumentando el número de entidades (entrada de agave)



Estos resultados evidencian los problemas actuales de la línea de producción, 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 4.9, 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”.

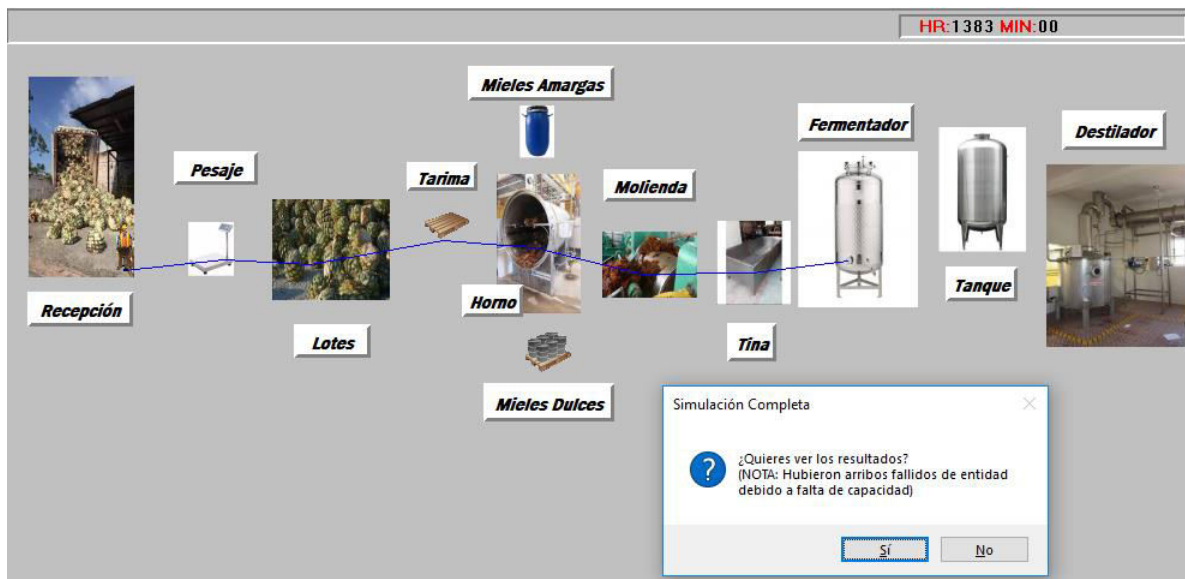


Figura 4.9. Corrida con aumento de la producción (arribos fallidos)



#### 4.1.5. Resultados de la verificación y validación del modelo de simulación

En esta sección, se evaluaron los resultados del modelo de simulación mediante el uso de datos probabilísticos, que se generaron con un análisis estadístico descriptivo previo de los números recolectados durante la estancia en la Planta Productora y en el transcurso del desarrollo del proyecto. Una vez realizado el estudio con los datos de entrada de materia prima y tiempo de ciclo vs Mezcal producido, se observó que existe una desviación en los resultados, respecto a los obtenidos en el sistema real de producción; además, se utilizó el estudio para comprobar si las diferencias son estadísticamente significativas en los tiempos de ciclo y cargas para procesar la materia prima entre los datos reales y/o históricos de producción de mezcal.

Se utilizó el software denominado Minitab para dar inicio con la verificación y validación de los resultados, ya que ofrece muchos análisis estadísticos, tales como regresión, ANOVA, herramientas de calidad, series de tiempo, diseño de experimentos (DOE), etcétera. Las gráficas incorporadas ayudan a visualizar los datos y validar los resultados. Se eligió Minitab, ya que también puede mostrar y almacenar valores estadísticos y medidas de diagnóstico.

El diseño de experimentos (DOE) ayudó a investigar los efectos de las variables de entrada (factores) sobre una variable de salida (respuesta) al mismo tiempo. Estos experimentos consistieron en una serie de corridas, o pruebas, en las que se realizaron cambios intencionales en las variables de entrada (carga y tiempo de ciclo). En cada corrida se recolectan datos. El DOE se utilizó para identificar las condiciones del proceso y los componentes que afectan en el proceso de producción de Mezcal, para luego determinar la configuración de factores que podría optimizar los resultados. Minitab ofrece cinco tipos de diseños: diseños de cribado, diseños factoriales, diseños de superficie de respuesta, diseños de mezcla y diseños de Taguchi (también llamados diseños robustos de Taguchi).



Los pasos que se deben seguir en Minitab para crear, analizar y visualizar un experimento diseñado son similares para todos los tipos. Se utilizó el diseño factorial  $2^k$ , una vez realizado el experimento e ingresados los resultados del simulador, se obtuvieron los resultados que se muestran en la figura 4.10. En el análisis de varianza los asteriscos representan valores faltantes que no se puede calcular porque el modelo está saturado y no hay suficientes grados de libertad para el error.

↓	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8
	OrdenEst	OrdenCorrida	PtCentral	Bloques	Carga	Tiempo	Mezcal	
1	1	1	1	1	450	115	600	
2	2	2	1	1	750	125	600	
3	3	3	1	1	450	125	500	
4	4	4	1	1	750	175	600	
5								
6								

### Análisis de Varianza

Fuente	GL	SC		Valor F	Valor p
		Ajust.	Ajust.		
Modelo	3	7500	2500	*	*
Lineal	2	7236	3618	*	*
Carga	1	6507	6507	*	*
Tiempo	1	4870	4870	*	*
Interacciones de 2 términos	1	4808	4808	*	*
Carga*Tiempo	1	4808	4808	*	*
Error	0	*	*		
Total	3	7500			

### Coefficientes codificados

Término	Efecto	Coef	EE del		Valor p	FIV
			coef.	Valor T		
Constante		415.7	*	*	*	
Carga	301.5	150.8	*	*	*	17.25
Tiempo	-291.5	-145.8	*	*	*	13.67
Carga*Tiempo	238.5	119.3	*	*	*	11.07

### Resumen del modelo

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
*	100.00%	*	*

### Ecuación de regresión en unidades no codificadas

$$\text{Mezcal} = 3475 - 3.833 \text{ Carga} - 25.00 \text{ Tiempo} + 0.03333 \text{ Carga*Tiempo}$$

Figura 4.10. Identificación de efectos importantes del DOE: Regresión Factorial



Los valores o resultados faltantes no aparecen en la tabla porque es imposible para Minitab calcular estos estadísticos. No es posible calcularlos porque hay 0 grados de libertad (GL) para el error residual.

Minitab proporcionó varias herramientas analíticas, pero, respecto a las gráficas los resultados fueron limitados ya que el software solo generó un gráfico (figura 4.11). Los resultados mostraron el valor absoluto de los efectos en el diagrama de Pareto. Los efectos que se extienden más allá de la línea de referencia son significativos. *Carga* (A), *Tiempo* (B) y *Carga\*Tiempo* (AB) no son significativos. Estas herramientas visuales suelen ser de gran ayuda para entender los resultados.

### Pareto de los efectos de Mezcal

\* NOTA \* No se puede graficar el tipo de residuo especificado, porque MSE = 0 o los grados de libertad para error = 0.

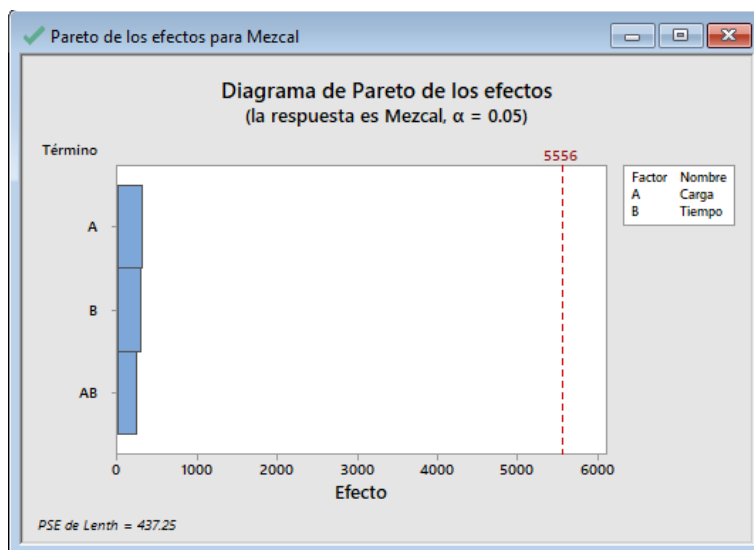


Figura 4.11. Gráfica de efectos



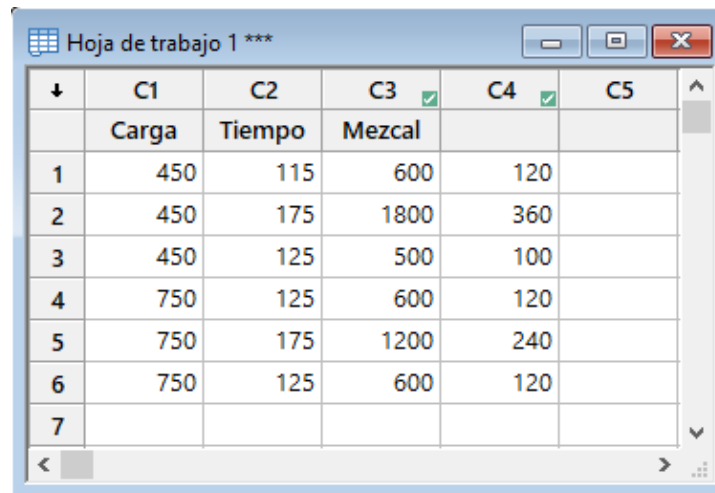
Para resolver la situación de los resultados del DOE antes mencionados, se identificó que se debe ajustar el modelo sin uno o más de los términos de interacción, dependiendo del número de factores e interacciones a utilizar o evaluar. Para determinar la interacción de orden más alto que debe eliminar de un modelo saturado, se pueden utilizar las gráficas de los efectos para estimar la significancia estadística de las interacciones.

De acuerdo con los resultados del DOE no fue posible sacar conclusiones, se determinó que los datos obtenidos no son favorables, debido a que no se tienen suficientes argumentos válidos para establecer que son estadísticamente significativos, por lo tanto, se optó por utilizar otra técnica de validación y verificación del modelo de simulación. Esta interpretación se realizó con el respaldo del análisis estadístico formal (figura 4.11), se analizó con detalle lo que pasó en el experimento, desde contrastar las conjeturas iniciales con los resultados del experimento, hasta observar los nuevos aprendizajes que sobre el proceso se lograron, además de verificar supuestos siempre con apoyo de las pruebas estadísticas.

Para concluir el estudio experimental fue necesario decidir qué medidas implementar para generalizar el resultado del estudio, por lo tanto, otro método que se utilizó en esta sección fue el análisis de regresión, que es un procedimiento que genera una ecuación para describir la relación estadística entre uno o más predictores y la variable de respuesta. La regresión lineal generalmente utiliza el método de estimación de mínimos cuadrados ordinarios, del cual se obtiene la ecuación al minimizar la suma de los residuos al cuadrado. Para los predictores se utilizaron factores del tipo fijos. En el análisis se codificaron los niveles de los factores como variables indicadoras usando un esquema de codificación binario (0,1), aunque se podría cambiar por un esquema de codificación 1,0,-1. No se utilizaron covariables, que podrían estar cruzadas entre sí o cruzadas con factores, o pueden estar anidadas dentro de factores. La regresión puede realizar comparaciones múltiples entre las medias de los niveles de los factores para hallar diferencias significativas.



Este análisis se realizó con los datos de la tabla 4.4 y fueron recolectados mediante los resultados del modelo de simulación, también se tenían documentos y toma de datos históricos de carga y tiempo de cada una de las actividades, especificando cuanto tiempo se debería tardar en cada una de las actividades que se realizan por etapa en la producción de Mezcal.



↓	C1	C2	C3 <input checked="" type="checkbox"/>	C4 <input checked="" type="checkbox"/>	C5	↑
	Carga	Tiempo	Mezcal			
1	450	115	600	120		
2	450	175	1800	360		
3	450	125	500	100		
4	750	125	600	120		
5	750	175	1200	240		
6	750	125	600	120		
7						

Tabla 4.4. Datos obtenidos del modelo de simulación

Luego, el modelo resultante, podría usarse para predecir los valores de nuevas observaciones, identificar la combinación de valores predictores que en conjunto optimicen uno o más valores ajustados y crear gráficas de superficie, gráficas de contorno y gráficas factoriales.

Se revisó el apartado del análisis de varianza en los resultados (tabla 4.5), para determinar si la asociación entre la respuesta y cada término incluido en el modelo fue estadísticamente significativa, se comparó el valor p del término con el nivel de significancia para evaluar la hipótesis nula. La hipótesis nula es que no hay asociación entre el término y la respuesta.





Por lo general, un nivel de significancia (denotado como  $\alpha$  o alfa) de 0.05 funciona adecuadamente. Un nivel de significancia de 0.05 indica un riesgo de 5% de concluir que existe una asociación cuando no hay una asociación real.

### Análisis de Varianza

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Regresión	1	1109400	1109400	20.27	0.011
Tiempo	1	1109400	1109400	20.27	0.011
Error	4	218933	54733		
Falta de ajuste	3	218933	72978	*	*
Error puro	1	0	0		
Total	5	1328333			

*Tabla 4.5. Análisis de varianza del diseño de experimentos*

Los resultados muestran que el valor p es menor que el nivel de significancia, se pudo concluir que existe una asociación estadísticamente significativa entre la variable de respuesta y el término. Lo más conveniente es que se vuelva a ajustar el modelo con el término, porque, en este caso hay un predictor sin una asociación estadísticamente significativa con la respuesta, se tendría que reducir el modelo eliminando términos uno a la vez.

Para determinar qué tan bien se ajusta el modelo a los datos, se examinaron los estadísticos de bondad de ajuste en la tabla 4.6, en el apartado de los resultados con la descripción de resumen del modelo.



## Resumen del modelo

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
233.952	83.52%	79.40%	41.30%

Tabla 4.6. Resultados clave: S, R-cuad., R-cuad.(ajustado), R-cuad.(pred)

En estos resultados, el modelo mostró aproximadamente 84% de la variación en la respuesta. Para estos datos, el valor de  $R^2$  indicó que el modelo proporciona un ajuste adecuado a los datos. Pero, como se ajustó el modelo con diferentes predictores, se utilizaron los valores ajustados de  $R^2$  y los valores pronosticados de  $R^2$  para comparar qué tan bien se ajustan los modelos a los datos; en los resultados se observó que el primer dato es favorable, en cambio, el segundo dato no es muy representativo.

El valor de S se utilizó para evaluar qué tan bien el modelo describe la respuesta, no se consideró el resultado ya que normalmente S se utiliza en lugar de los estadísticos  $R^2$  para comparar el ajuste de los modelos que no tienen una constante (tabla 4.6). S se mide en las unidades de la variable de respuesta y representa la distancia que separa a los valores de los datos de los valores ajustados. Mientras más bajo sea el valor de S, mejor será descrita la respuesta por el modelo. Sin embargo, un valor de S bajo no indica por sí solo que el modelo cumple con los supuestos del modelo. En este caso el valor de S fue alto, por lo que fue necesario examinar las gráficas de residuos para verificar los supuestos.

Los coeficientes obtenidos se muestran a continuación en la tabla 4.7, estos describen el tamaño y la dirección de la relación entre un término incluido en el modelo y la variable de respuesta.



Además, los coeficientes representan para un término el cambio en la respuesta media asociado con un aumento de una unidad codificada en ese término, mientras los otros términos se mantienen constantes. El signo del coeficiente nos indica la dirección de la relación entre el término y la respuesta.

El tamaño del coeficiente es la mitad del tamaño del efecto. El efecto representa el cambio en la respuesta media pronosticada cuando un factor cambia de su nivel bajo a su nivel alto. El tamaño del efecto por lo general es una buena manera de evaluar la significancia práctica del efecto que un término tiene en la variable de respuesta. El tamaño del efecto no necesariamente indica si un término es estadísticamente significativo porque los cálculos de significancia también consideran la variación en los datos de respuesta. Para determinar la significancia estadística, se examinó el valor p del término.

### Coeficientes

Término	Coef	EE del coef.	Valor T	Valor p	FIV
Constante	-1525	543	-2.81	0.049	
Tiempo	17.20	3.82	4.50	0.011	1.00

*Tabla 4.7. Coeficientes del modelo*

Este análisis de regresión generó una ecuación donde se describe la relación estadística entre uno de los predictores (tiempo) y la variable de respuesta (Mezcal); la ecuación 4.1 se utilizó para predecir nuevas observaciones. Como se mencionó anteriormente, la regresión lineal generalmente utiliza el método de estimación de mínimos cuadrados ordinarios, del cual se obtiene la ecuación al minimizar la suma de los residuos al cuadrado.



## Ecuación de regresión

*Ecuación 4.4*

$$\text{Mezcal} = -1525 + 17.20 \text{ Tiempo}$$

La tabla 4.8 muestra las nuevas observaciones obtenidas mediante la ecuación de regresión. En los datos obtenidos con la ecuación se presentaron observaciones poco comunes (también llamadas observaciones influyentes) son observaciones que tienen un impacto desproporcionado en un modelo de regresión. Fue importante identificar las observaciones poco comunes porque pueden producir resultados engañosos. Ya que, una observación poco común puede hacer que un coeficiente significativo parezca insignificante.

*Tabla 4.8. Resultados de nuevas observaciones mediante la ecuación de regresión*

Lote	TC	Mezcal Simulador	Mezcal Factor	Mezcal Teórico
1	122	573	69	81
2	125	625	75	81
3	127	659	79	82
4	147	1003	120	82
5	171	1416	170	82
6	175	1485	178	83

Las observaciones poco comunes pueden ser de cualquiera de estos dos tipos o de ambos tipos; puntos de apalancamiento, que sean extremos en la dirección  $x$  y valores atípicos (residuos grandes), que sean extremos en la dirección  $y$  en relación con la línea de regresión ajustada.



Por otro lado, los resultados de las gráficas se utilizaron como ayuda para determinar si el modelo fue adecuado y si cumplió con los supuestos del análisis. Si los supuestos no se cumplen, el modelo podría no ajustarse adecuadamente a los datos y se debería tener cuidado al interpretar los resultados. La gráfica de residuos vs ajustes se utilizó para verificar el supuesto de que los residuos están distribuidos aleatoriamente y tienen una varianza constante. Lo ideal es que los puntos se ubiquen aleatoriamente a ambos lados del 0, con patrones no detectables en los puntos.

Los patrones que se observaron en esta grafica de residuos vs ajustes (figura 4.12) fue que los puntos no parecen estar distribuidos aleatoriamente alrededor de cero, parece haber valores atípicos ya que los puntos están alejados del cero.

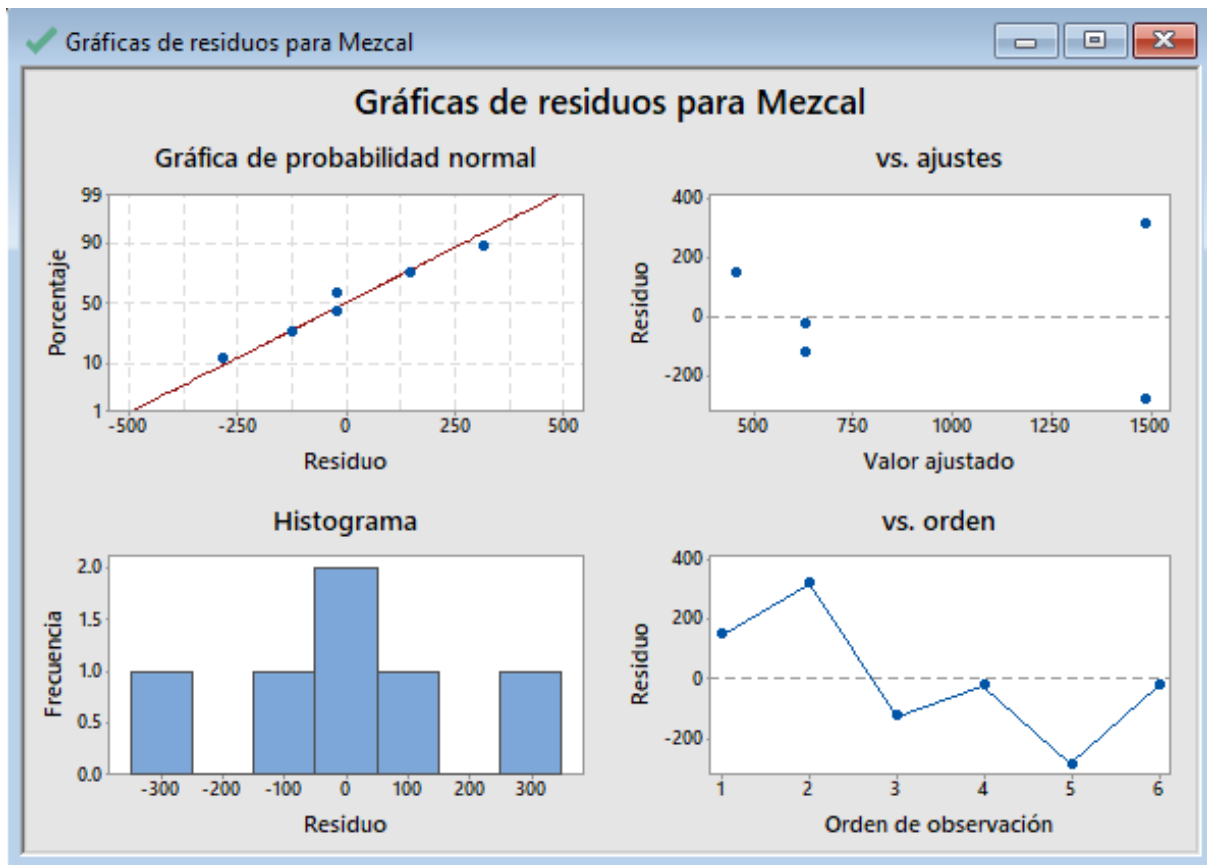


Figura 4.12. Gráficas de residuos para mezcal



Mediante la gráfica de residuos vs orden en la figura 4.12, se verificó el supuesto de que los residuos son independientes entre sí. Los residuos independientes no muestran tendencias ni patrones cuando se muestran en orden cronológico. Los patrones en los puntos podrían indicar que los residuos que están cercanos entre sí podrían estar correlacionados y, por lo tanto, podrían no ser independientes.

Lo ideal es que los residuos que se muestran en la gráfica se ubiquen aleatoriamente alrededor de la línea central. Se observó un patrón en esta gráfica de residuos vs orden, los residuos parecen estar distribuidos aleatoriamente alrededor de cero con una tendencia a medida que aumenta el orden de observación.

En la figura 4.12 se muestra la gráfica de probabilidad normal de los residuos y se utilizó para verificar el supuesto de que los residuos están distribuidos normalmente. La gráfica de probabilidad normal de los residuos debe seguir aproximadamente una línea recta. Los patrones que se observaron en esta gráfica de probabilidad normal, indicaron que los puntos generalmente siguen una línea recta. No hay evidencia de no normalidad, valores atípicos o variables no identificadas. Estos patrones que se observaron en la gráfica podrían indicar que el modelo cumple con los supuestos del modelo.

#### **4.1. Conclusiones**

Se enfatizó a lo largo del desarrollo del proyecto 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 presente trabajo logra representar el sistema real por medio de un modelo de simulación discreta.



En el análisis sistémico de la simulación se evidenció cuellos de botella en diferentes etapas del proceso productivo, causa asignada al tiempo de ciclo. Además, se identificó como actividad restrictiva de la línea la etapa de fermentación, situación que obliga a instalar o habilitar equipos provisionales en el proceso, que se convierten en gastos directos para la compañía.

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.).

Como primera línea de continuación para futuros trabajos se recomienda efectuar ejercicios complejos de simulación donde puedan ponerse en prueba variables críticas de la operación; además, tomando como base la estructura de este modelo, dar continuidad al presente trabajo para el beneficio de agregar elementos de justificación sobre el uso de la herramienta de simulación.

## BIBLIOGRAFÍA

- Adam, E. E., & Ebert, R. J. (1991). *Administración de la producción y las operaciones: conceptos, modelos y funcionamiento*. Prentice Educación.
- Alarcón, M. D. (2013). Revoluciones industriales, trabajo y estado del bienestar: la gran ruptura mundial contemporánea. *Pasado y memoria: Revista de historia contemporánea*(12), 226-228.
- Anderson, D. R., Sweeney, D. J., Williams, T. A., Camm, J. D., & Kipp, M. (2011). *Métodos cuantitativos para los negocios* (11 ed.). México, D.F.: Cengage Learning Editores, S.A. de C.V.
- Balakrishnan, R. (2001). The Toyota Production System, A Case Study of Creativity and Innovation in Automotive Engineering.





- Ballou, R. (2004 ). *Logística: Administración de la cadena de suministro*. México: Pearson Educación.
- Bangalore Indian Institute. (2015). Diploma in Supply Chain Management. *Supply Chain: Ecosystems* (pág. Unit 2). NPTEL.
- Banks, J., Carson, I. I., Nelson, B. L., & Nicol, D. M. (2005). *Discrete-event system simulation*. Pearson.
- Baweja, B., Donovan, P., Haefele, M., & Siddiqi, L. &. (2016). Extreme automation and connectivity: The global, regional, and investment implications of the Fourth Industrial Revolution. *UBS White Paper for the World Economic Forum Annual Meet*.
- Becker, R. M. (2001). Learning to Think Lean: Lean Manufacturing and the Toyota Production System. *Automotive Manufacturing & Production*. 113.
- Benešová, A., & Tupaa, J. (2017). Requirements for education and qualification of people in industry 4.0. *Procedia Manufacturing*, 11, 2195-2202.
- Blanchard, D. (2010). *Supply chain management best practices* (Segunda ed.). USA : John Wiley & Sons.
- Botero, A. M., Arbeláez, S. O., & Mendoza, V. J. (2007). Método ANOVA utilizado para realizar el estudio de repetibilidad y reproducibilidad dentro del control de calidad de un sistema de medición. *Scientia et technica*, 1(37).
- Box, G. E., G., H. W., & S., H. J. (1978). *Statistics for experimenters*. Wiley, Nueva York.
- Büyüközkan, G., & Göçer, F. (2018). Digital supply chain: Literature review and a proposed framework for future research. *Computers in Industry*, 97, 157-177.
- Cachon, G., & Terwiesch, C. (2004). *Matching supply with demand: An introduction to operations management*. Mc Graw-Hill Custom Publishing, New York.
- Cantú, G. J., Guardado, G. M., & Balderas, H. J. (2016). Simulación de procesos, una perspectiva en pro del desempeño operacional. *Revista Iberoamericana de Producción Académica y Gestión Educativa*(4).
- Chapman, S. N. (2006). *Planificación y control de la producción* (Primera ed.). Pearson Educación.



- Chase, R. B., Jacobs, F. R., & Aquilano, N. J. (2009). *Administración de operaciones, producción y cadena de suministros* (Duodécima ed.). Jacobs, F. R., & Chase, R. B. (2000)., México: Mc Graw-Hill Interamericana.
- Chhaged, D., & Lowe, T. J. (2008). *Building intuition: insights from basic operations management models and principles* (Vol. 115). Springer Science & Business Media. doi:10.1007/978-0-387-73699-0
- Cochran, W. G., & Cox, G. M. (1990). *Diseños experimentales*. México: Trillas.
- Coss, B. R. (2003). *Simulación: un enfoque práctico*. Limusa. Noriega Editores.
- Cruz, E., Restrepo, C., & Medina, P. (2006). Aplicación de un modelo factorial de experimentación en un ingenio azucarero del Valle del Cauca. *Scientia et Technica*. Año XII(32), 313-318.
- de Vargas, A. P., & Santos, V. A. (1996). *Bioestadística*. Ramón Areces.
- Díaz, A. (2009). *Diseño estadístico de experimentos* (2 ed.). Universidad de Antioquia.
- Ferré, J., & Rius, X. (Octubre de 2003). "Diseño factorial completo 2k," *Técnicas de Laboratorio*. 25(287), 999-1004.
- Fishwick, P. A. (1995). Simulation Model Design. *Winter Simulation Conference* , 209.
- García, D. E., García, R. H., & Cárdenas, B. L. (2012). *Simulación y análisis de sistemas con Promodel* (2 ed.). México: Pearson Educación.
- García-Herrera, E. J., Méndez-Gallegos, S. d., & Talavera-Magaña, D. (2010). El genero *Agave spp.* en México: Principales usos de importancia socioeconómica y agroecológica. *RESPYN Revista de Salud Pública y Nutrición*, 5, 109-129.
- Gnugnoli, H., & citado por Coss Bu, R. (2003). *Simulación: un enfoque práctico*. México: Limusa.
- Goldratt, E., & Cox, J. (2016). *The goal: A process of ongoing improvement*. Routledge.
- Greif, M. (1994). *La fábrica visual, métodos visuales para mejorar la productividad*.
- Gross, D. (2008). *Fundamentals of queueing theory, Fourth Edition*. John Wiley & Sons. doi:10.1002/9781118625651
- GTI. (2014). *Industria 4.0 - Smart Manufacturing for the Future*. Berlin: German Trade & Invest.



- Gupta, M., & Kline, J. (2008). Managing a community mental health agency: A Theory of Constraints based framework. *Total Quality Management*, 19(3), 281-294.
- Gutiérrez, P. H., & De la Vara, S. R. (2012). *Análisis y diseño de experimentos*. New York, NY, USA: Mc Graw-Hill.
- Hermann, M., Pentek, T., & Otto, B. (2015 ). *Design principles for Industrie 4.0 scenarios: A literature review*. Dortmund: Technische Universität Dortmund.
- Hillier, F. S., Hillier, M. S., & Lieberman, G. J. (2006). *Métodos cuantitativos para administración: un enfoque de modelos y casos de estudio, con hoja de cálculo*. México: McGraw-Hill.
- Hillier, F. S., Lieberman, G. J., & Osuna, M. A. (1997). *Introducción a la Investigación de Operaciones* (Vol. 1). McGraw-Hill.
- Hitpass, B. (2017). *BPM: Business Process Management: Fundamentos y Conceptos de Implementación* (4a ed.).
- Hopp, W. J., & Spearman, M. L. (2011). *Factory physics* (3 ed.). Waveland Press.
- Icarte Ahumada, G. A. (2016 ). Aplicaciones de inteligencia artificial en procesos de cadenas de suministros: una revisión sistemática. *Ingeniare. Revista chilena de ingeniería*, 24(4), 663-679.
- IMD World Competitiveness Center. (2017). *World Competitiveness Ranking*. Zúrich: IMD.
- Inman, R., Lair, S. M., & Green, J. K. (2009). Analysis of the relationships among TOC use, TOC Outcomes, and organizational performance. *International Journal of Operations and Production Management*, 29(4), 341-356.
- Kagermann, H., Helbig, J., Hellinger, A., & Wahlster, W. (2013 ). *Recommendations for implementing the strategic initiative INDUSTRIE 4.0: Securing the future of German manufacturing industry*. Forschung: Industrie 4.0 Working Group.
- Korpela, K., Hallikas, J., & Dahlberg, T. (2017). Digital supply chain transformation toward blockchain integration. *In proceedings of the 50th Hawaii international conference on system sciences*.



- Krajewski, L. J., Ritzman, L. P., Malhotra, M. K., Villareal, C., & del Pilartr, M. (2008). *Administración de operaciones: Procesos y cadenas de valor/Opertions management*. Pearson Educación.
- Little, J. D. (2011). Little's Law as Viewed on Its 50th Anniversary. *Operations research*, 59(3), 536-549.
- Löffler, M., & Tschiesner, A. (2013). *The Internet of Things and the future of manufacturing*. Munich: McKinsey & Company.
- López, N. G., Martínez, F. J., Cavazos, A. J., & Mayett, M. 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.
- Lye, L. (2005). Tools and toys for teaching design of experiments methodology . *33rd Annual General Conference of the Canadian Society for Civil Engineering*. Lye, L.M. (2005). Tools and toys for teaching design of experiments methToronto, Ontario, Canada.
- Mabin, V. J., & Balderstone, S. J. (1999 ). *The world of the theory of constraints: A review of the international literature*. CRC Press.
- Maisel, H., & citado por Coss Bu, R. (2003). *Simulación: un enfoque práctico*. México: Limusa.
- Mathur, K., Solow, D., Domínguez Reyes, A. C., & Marina, T. (1996). *Investigación de las operaciones: El arte de la toma de decisiones*. México: Prentice Hall Hispanoamericana Perason Educación.
- Medina Varela, P. D., & Lopez Reyes, A. M. (2011). Análisis crítico del diseño factorial 2k sobre casos aplicados. *Scientia et Technica Año XVIII(47)*.
- Meissner, H., Ilse, R., & Aurich, J. C. (2017). Analysis of control architectures in the context of Industry 4.0. *Procedia CIRP*, 62, 165-169.
- Merlino, M., & Sprogue, I. (2017). The augmented supply chain. *Procedia Engineering*, 178, 308-318.
- Monge, C., Cruz, J., & López, F. (2013 ). Impact of Lean Manufacturing, Sustainable Manufacturing and Continuous Improvement on Operation Efficiency and Environmental Responsibility in Mexico. *Información Tecnológica*, 24(4), 15-32.



- Monks, J. G. (2005). *Administración de operaciones*. México: McGraw-Hill.
- Montgomery, D. (2005). *Design and Analysis of Experiments*. John Wiley & Sons, Inc.
- Moskowitz, H., & Gordon, W. P. (1982). *Investigación de Operaciones*.
- Murillo, A. P., Guillén, G. G., Ponce, O. J., Castro, M. A., Serna, G. 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.
- Naylor, T. H., & citado por Coss Bu, R. (2003). *Simulación: un enfoque práctico*. México: Limusa.
- Ohno, T. (1988). *Toyota production system, beyond large-scale production*. Productivity Press.
- Pastor, R. T. (2010). Aplicación de la simulación a un sistema de colas de canal simple. *Perspectivas*(26), 91-112.
- Peterman, M. (2001). Lean manufacturing and the quality quest. *Tooling & Production*, 56(4).
- Porter, M., & Heppelmann, J. (2014). How smart, connected products are transforming competition. *Harvard business review*, 92(11), 64-88.
- Pública, E. D., De, A., C. D., & Inversión, L. (2008). *La Planificación y la Toma de Decisiones por Medio de la Utilización de Pronósticos*.
- Rahman, S. U. (1998). Theory of constraints: A review of the philosophy and its applications. *International Journal of Operations & Production Management*, 18(4), 336-355.
- Render, B., & Heizer, J. (2009). *Principios de Administración de Operaciones* (Duodécima ed.). Pearson Educación.
- San Juan, C. (1993). *La revolución industrial* (Vol. 50). Madrid: AKAL.
- Sarduy, D. Y. (2007). El análisis de información y las investigaciones cuantitativa y cualitativa. *Revista cubana de salud pública*(33).
- Schroeder, R. G. (1999). *Administración de operaciones. Toma de decisiones en la función de operaciones* (Vol. 1). México: McGraw-Hill.
- Serrano, A. V. (2017 ). *Economía y medio ambiente*. Madrid: Centro de Estudios Ramon Areces SA.



- Shortle, J. F., Thompson, J. M., Gross, D., & Harris, C. M. (2018). *Fundamentals of queueing theory* (Vol. 399). John Wiley & Sons.
- Simatupang, T., Wright, A., & Sridharan, R. (2004). Applying the theory of constraints to supply chain collaboration. *Supply chain management: An international journal*, 9(1), 57-70.
- Sipper, D., & Bulfin, R. L. (1999). *Planeación y control de la producción*. , México: McGraw-Hill.
- Spearman, M. L., & Hopp, W. J. (1996 ). *Factory Physics: Foundations of Manufacturing Management* (Vol. 439). Chicago: Irwin/McGraw-Hill.
- SPM Coveñas. (2016). *Plan de gestión integral de residuos sólidos*. Coveñas: Secretaría de Planeación Municipal de Coveñas.
- Sung, T. K. (2018). Industry 4.0: A Korea perspective. *Technological Forecasting & Social Change*, 132, 40-45.
- Syam, N., & Sharma, A. (2018). Waiting for a sales renaissance in the fourth industrial revolution: Machine learning and artificial intelligence in sales research and practice. *Industrial Marketing Management*, 69, 135-146.
- Taha, H. A. (2011). *Investigación de Operaciones* (5a ed.). México: Alfaomega.
- Takahashi, Y., & Tanaka, N. (2017). Searching leverage point to increase sales of a vertically integrated black tea company. *Winter Simulation Conference*, 4520-4521.
- Tawfik, L., Chauvel, A. M., & Araiza, J. G. (1984). *Aministración de la producción*. Nueva Editorial Interamericana.
- Taylor III, L., & Churchwell, L. (2004). Goldratt's thinking process applied to the budget constraints of a texas MHMR facility. *Journal of Health and Human Services Administration*, 26 (4), 416-437.
- 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*, 4490-4491.
- Thomson, J. (2015). *High integrity systems and safety management in hazardous industries*. Butterworth-Heinemann.



- Tiwari, S., Wee, H. M., & Daryanto, Y. (2018 ). Big data analytics in supply chain management between 2010 and 2016: Insights to industries. *Computers & Industrial Engineering*, 115, 319-330.
- Tjahjonoa, B., Esplugues, C., Ares, E., & Pelaez, G. (2017). What does Industry 4.0 mean to Supply Chain. *Procedia Manufacturing*, 13, 1175-1182.
- Wagner, T., Herrmann, C., & Thiede, S. (2017 ). Industry 4.0 impacts on lean production systems. *Procedia CIRP*, 63, 125-131.
- Wee, D., Kelly, R., Cattell, J., & Breunig, M. (2015). Industry 4.0: How to navigate digitization of the manufacturing sector. 58.
- WEF. (2016). *The Global Information Technology Report: Innovating in the Digital Economy*. Ginebra: Silja Baller (World Economic Forum), Soumitra Dutta (Cornell University), and Bruno Lanvin (INSEAD) .
- Weiser, M., & Brown, J. (1995 ). Designing calm technology. *PowerGrid Journal*, 1(1), 75-85.
- Wilson, J. M. (2003 ). Gantt charts: A centenary appreciation. *European Journal of Operational Research*, 149(2), 430-437. doi:10.1016/S0377-2217(02)00769-5
- Winston, W. L., & Goldberg, J. B. (2005). *Investigación de operaciones: aplicaciones y algoritmos*. México: Thomson Learning.
- Witenberg, J. P. (1999). *Métodos y modelos de investigación de operaciones* (Vol. 1). México: Limusa.
- Woodrow, C., & Grant, M. (2010). The Third Industrial Revolution. En *Sustainable Communities Design Handbook* (págs. 9-22). Boston: Butterworth-Heinemann.
- Zeigler, B. P. (1976). *Theory of Modelling and Simulation*. Wiley & Sons. New York.
- Zezulka, F., Marcon, P., Vesely, I., & Sajdl, O. (2016 ). Industry 4.0 – An introduction in the phenomenon. *International Federation of Automatic Control Papers*, 49(25), 8.
- Zhao, R., Ichimura, H., & Takakuwa, S. (2013). MFCA-based simulation analysis for production lot-size determination in a multi-variety and small-batch production system. *Winter Simulation Conference: Simulation Making*.
- Zúñiga, S. R. (2005). Operaciones: concepto, sistema, estrategia y simulación. *Academia. Revista Latinoamericana de Administración*(34), 1-24.

# **Anexo 1:** Carátula de publicación de artículo



# **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

# **Anexo 2:** Estancia en la Planta Productora de Mezcal

