

REDUCCIÓN DE LOS COSTOS ASOCIADOS A LA PRODUCCIÓN MEDIANTE SIMULACIÓN MONTE CARLO Y PLANEACIÓN AGREGADA

TREDUCTION OF COSTS ASSOCIATED WITH PRODUCTION THROUGH MONTECARLO SIMULATION AND AGGREGATE PLANNING

Gonzalo Paul López Cruz

Tecnológico Nacional de México / IT de Celaya, México
m2003054@itcelaya.edu.mx

José Alfredo Jiménez García

Tecnológico Nacional de México / IT de Celaya, México
alfredo.jimenez@itcelaya.edu.mx

Salvador Hernández González

Tecnológico Nacional de México / IT de Celaya, México
salvador.hernandez@itcelaya.edu.mx

Manuel Darío Hernández Ripalda

Tecnológico Nacional de México / IT de Celaya, México
dario.hernandez@itcelaya.edu.mx

Recepción: 22/noviembre/2021

Aceptación: 13/septiembre/2022

Resumen

En cualquier empresa es fundamental tener un buen control de su producción. Las empresas constantemente se ven afectadas en la demanda, originado por los factores estacionales que sufre a lo largo del año. Estas afectaciones se originan por problemas que no se habían supuesto, debido a que la demanda es una variable aleatoria que no se tiene control de ella, por esta razón se podría llegar a tomar una mala decisión en la administración de la producción al no considerar la aleatoriedad que existe en la demanda. Para la administración de la producción una de las mejores herramientas es la aplicación de la planeación agregada para reducir los costos asociados a la administración de la producción. En este trabajo se analizaron las estrategias de planificación agregada bajo un enfoque de simulación Monte Carlo para reducir costos de producción. Se obtuvo mediante el método de

simulación que genere soluciones para las distintas estrategias de la planeación agregada mediante un modelo orientado a la reducción de costos de producción considerando las variables como fuerza laboral, niveles de inventario, horas extras y subcontratación para satisfacer diferentes patrones de la demanda.

Palabras Clave: Demanda, Planeación agregada, Simulación Monte Carlo.

Abstract

In any company it is essential to have good control of its production. Companies are constantly affected by demand, caused by seasonal factors that suffer throughout the year. These affectations originate from problems that are not random assumption, because demand is a variable that is not controlled by it, for this reason, a bad decision could be made in the production management decision by not considering the randomness that exists in demand. For production management, one of the best tools is the application of aggregate planning to reduce the costs associated with production management. In this work aggregate planning strategies were analyzed under a Monte Carlo simulation approach to reduce production costs. It was obtained through the simulation method that generated solutions for the different strategies of aggregate planning a model aimed at reducing production costs considering variables such as workforce, inventory levels, overtime and subcontracting to satisfy different demand patterns.

Keywords: Demand, Aggregate Planning, Monte Carlo Simulation.

1. Introducción

Las Tener una buena administración en la producción es primordial para que las organizaciones sean capaces de cumplir con sus metas. Para lograrlo es importante una buena toma de decisiones que impliquen identificar el problema, y después elegir la mejor solución. Una mala decisión puede tomarse cuando no se utiliza toda la información disponible, no analizan todas las alternativas, y esto puede afectar el éxito de la organización. Usualmente las empresas toman sus decisiones en relación con sus niveles de inventario, mano obra, tiempo extra basado en pronósticos de la demanda, para satisfacer la producción requerida. La necesidad

de estos recursos puede verse afectada por distintos factores como tendencias en el mercado, ventas inesperadas y sucesos que no se tenían previstos. Por esta razón es necesario minimizar los costos de producción mediante herramientas que consideren la aleatoriedad de la demanda para la toma de decisiones.

El plan agregado de operaciones se ocupa de establecer los índices de producción por grupo de productos u otras categorías a mediano plazo de 3 a 18 meses. El propósito principal del plan agregado es especificar la combinación óptima de índice de producción, nivel de la fuerza de trabajo e inventario a la mano [Chase, Jacobs, & Aquilano, 2006]. [Jang & Chung, 2020] proponen optimizar de manera robusta el problema planificación agregada de la producción bajo errores de implementación relacionados con la contratación y el despido, desarrollando una partícula de dos niveles, un modelo de optimización de enjambre encontrando la solución óptima a las variaciones inesperadas en la fuerza laboral de la incertidumbre en la contratación y despido. [Babak Rasmi, Kazan, & Turkay, 2019] analizan pilares económicos, sociales, ambientales y culturales de manera inclusiva; además, cada pilar incluye varios subpilares en el modelo en el cual representan de manera precisa el problema con variables binarias y continuas bajo consideraciones de sostenibilidad, apoyando el proceso de toma de decisiones de múltiples criterios en los problemas de planificación agregada de la producción en presencia de consideraciones de sostenibilidad. [Aboozar et al., 2019] evalúa el desempeño de las estrategias de planificación agregada de la producción en presencia de incertidumbre, utilizando método de simulación y programación multiobjetivo con el fin de proporcionar información comercial a los gerentes de operaciones sobre la efectividad y practicidad de las estrategias en presencia de incertidumbre recopilando datos del mundo real de la industrial de refrescos para validar e implementar los modelos. Debido a que la demanda es una variable aleatoria que deriva problemas de producción en niveles de mano de obra, niveles de inventarios, subcontratación, tiempo extra y ocioso cada una siendo una parte vital de la organización es por esto por lo que la planeación agregada es un buen método que aborda estas variables controlables, buscando determinar la cantidad de producción en un tiempo intermedio. Generalmente, la planeación agregada minimiza los costos

para el periodo planeado siendo una buena solución para el manejo de estos recursos, pero esto origina un problema ya que un modelo determinístico.

Por otra parte, la simulación Monte Carlo modela el comportamiento de elementos de azar generando valores de las variables que forman el modelo que se desea estudiar [Render, Stair, & Hanna, 2012]. [Ata, 2007] propone un criterio de convergencia para las estimaciones de Monte Carlo, que se puede utilizar como una regla de parada para los experimentos de Monte Carlo donde el criterio propuesto busca una banda de convergencia de un ancho y una longitud dados, de manera que la probabilidad de que las medias de la muestra de Monte Carlo caigan fuera de esta banda sea prácticamente nula. [Chang, 2017] desarrollo una simulación Monte Carlo para estimar el sistema confiabilidad para la fabricación multiestado con líneas de producción paralelas considerando un almacenamiento intermedio finito donde la confiabilidad del sistema indica la probabilidad de que todas las estaciones de trabajo brinden la capacidad suficiente para satisfacer una demanda específica y las memorias intermedias posean un almacenamiento adecuado. Es por esto que el método de simulación Montecarlo proporciona asistencia en la planeación agregada bajo una demanda estocástica, se podrá analizar los distintos costos de los planes agregados para determinar los niveles óptimos de fuerza de trabajo, niveles de inventario, subcontratación y hora extras.

2. Método

La planeación agregada se realiza a partir de pronósticos que predicen la demanda. Para hacer un buen pronóstico de la demanda es indispensable tener suficientes datos históricos. En esta investigación se aplicó la simulación Monte Carlo a la planeación agregada, considerando la demanda como una variable aleatoria con cierta distribución de probabilidad. De esta manera se analizaron las diferentes estrategias de planeación agregada y se calcularon los costos totales de cada plan, haciendo uso de las hojas de cálculo de Excel para Windows, en figura 1 se muestra un diagrama de flujo de cada etapa del procedimiento de reducción de costos de producción.



Figura 1 Procedimiento.

Para la propuesta de esta investigación donde se resuelve las diferentes estrategias de planeación agregada utilizando simulación Monte Carlo y considerando la demanda como una variable aleatoria estocástica. Estas estrategias mencionadas corresponden a cada plan agregado, con el objetivo de minimizar los costos totales de producción para determinar la combinación óptima de niveles de fuerza de trabajo, horas de trabajo e inventario.

Existen tres estrategias puras, cada una enfocada en solo uno de los aspectos mencionados y estrategia mixta que es la combinación de dos o más estrategias puras. La primera estrategia es de persecución, este plan contrata y despide trabajadores a medida que sea necesario para satisfacer la demanda, para los siguientes cálculos se llamara “plan 1, producción exacta, mano de obra variable”. La segunda estrategia es de nivel consiste en mantener una fuerza de trabajo estable con un índice de producción constante, se nombra “plan 2, fuerza de trabajo constante, inventario e inventario agotado variable”. La tercera estrategia es fuerza de trabajo estable, horas de trabajo variable, esta estrategia varia la producción ajustando las horas de trabajo por medio de horas extra o tiempo improductivo, para esta investigación no haremos uso de ella. Asimismo, los gerentes hacen uso de la subcontratación, esta estrategia adicional no hace contrataciones y despidos sino cambia la decisión de subcontratar o no, para estos cálculos se llamará “plan 3, mano de obra baja y constante, subcontratación”. Para el desarrollo de este trabajo se tomó la información del ejercicio que propone en el libro [Chase, Jacobs, & Aquilano, 2006]. En dicho ejercicio se tiene un horizonte de tiempo de 6 meses, los siguientes datos necesarios para la resolución de las estrategias de planeación agregada descritos en la tabla 1, proporcionando información de costos con moneda de dólar. Estos planes agregados necesitan distinta información para la resolución de cada uno de ellos, propiciando nuevos costos.

Tabla 1 Requisitos de la planeación agregada de la producción.

Materiales	\$100 unidad
Costo de mantenimiento de inventario	\$1.5 unidad/mes
Costo marginal del inventario agotado	\$5 unidad/mes
Costo marginal de la subcontratación	\$20 unidad
Costo de contratación y capacitación	\$200 trabajador
Costo de despido	\$250 trabajador
Horas de trabajo requeridas	5 horas la unidad
Costo del tiempo regular	\$4 hora
Costo extra	\$6 hora
Horas al día	8 horas al día
Inventario	
Inventario inicial	400 unidades
Inventario de seguridad	25% demanda mensual

Las técnicas de planeación agregada se realizaron mediante una demanda aleatoria. Las variables se generaron con distribución de probabilidad, mediante el método de simulación Monte Carlo. Se empleó la distribución normal, como se puede observar en la ecuación 1 y la distribución uniforme que se muestra en la ecuación 2 para generar una demanda aleatoria. [García Dunna, García Reyes, & Cárdenas Barrón, 2013].

$$N = \left(\left(\sqrt{-2 \ln(1 - r_i)} \right) \text{sen}(2\pi r_i) \right) \sigma + \mu \quad (1)$$

$$U_i = a + (b - a)r_i \quad (2)$$

Donde:

N : Distribución normal

μ : Media de la distribución normal

σ : Distribución estándar de la distribución normal

r_i : Número aleatorio

U_i : Distribución uniforme

a : Límite inferior de la distribución uniforme

b : Límite superior de la distribución uniforme

Posteriormente se efectuó el método estacional multiplicativo, en el cual los factores estacionales se multiplican por una estimación de la demanda promedio y así se obtiene un pronóstico estacional. Este método se aplicó en la distribución normal y

uniforme, generando diferentes costos totales en las estrategias de planeación agregada con una demanda aleatoria con distribución de probabilidad. Se realizó mediante los pasos:

- Obtener promedio de las ventas pasadas
- Calcular el factor estacional mediante la venta pasada de cada mes entre promedio de las ventas pasadas
- Pronosticar la demanda aleatoria esperada de cada mes obtenido por su distribución de probabilidad correspondiente, esto para tener el promedio de la demanda aleatoria.
- Por último, calcular el pronóstico estacional esperado, multiplicando el promedio de la demanda aleatorio por el factor estacional.

Este ajuste de descomposición se aplicó en la demanda aleatoria en cada una de las distribuciones de probabilidad. Los costos generados de los planes con su respectiva distribución se presentan de la siguiente manera, primero los costos de los planes agregados con simulación Montecarlo con una distribución normal. Segundo los costos obtenidos de la misma manera, pero con distribución uniforme. Por último, a cada distribución de probabilidad antes mencionada se aplicó una descomposición de serie temporal en la demanda en cada plan agregado para obtener nuevos costos. La aleatoriedad de la demanda, bajo el método de simulación Monte Carlo origino distintos costos totales de las estrategias planeación agregada en cada corrida. Para una mayor confianza en los resultados obtenidos se realizó el cálculo del tamaño de muestra. La ecuación 3 que es utilizada para este propósito. [Walpole, Myers, Myers, & Ye, 2012].

$$n = \left(\frac{Z_{\alpha} \theta}{e} \right)^2 \quad (3)$$

Para determinar el tamaño de muestra se utilizó un nivel de confianza del 95%, se definió un error de 10000 unidades monetarias (se definió esta cantidad debido a las cantidades de costos totales que se manejan para este problema lo cual representa un error menor al 1%), un tamaño de muestra de $n \geq 30$ y obtener la desviación estándar de la muestra. El tamaño de muestra obtenido proporciona el

resultado de réplicas necesarias. Con este número de muestra se obtiene el promedio de los costos de las estrategias planeación agregada y la demanda con su respectiva distribución de probabilidad.

El ajuste del pronóstico estacional se aplicó en la demanda aleatoria en cada una de las distribuciones de probabilidad. Los costos totales generados de los planes con su respectiva distribución se presentan de la siguiente manera, primero los costos totales de los planes agregados con simulación Monte Carlo con una distribución normal. Segundo los costos obtenidos de la misma manera, pero con distribución uniforme. Por último, a cada distribución de probabilidad antes mencionada, aplicando método estacional multiplicativo para obtener un pronóstico estacional en la demanda aleatoria con distribución de probabilidad, generando nuevos costos totales. Posteriormente se realizó una comparación de los costos promedio de las estrategias de planeación agregada, obtenidos del tamaño de muestra, se desarrolla de la siguiente manera:

- Costos con distribución normal contra los costos con distribución uniforme.
- Costos con distribución normal con estacionalidad multiplicativa contra los costos con distribución uniforme con estacionalidad multiplicativa
- Costos con distribución normal con estacionalidad multiplicativa contra los costos de distribución normal.
- Costos con distribución uniforme con estacionalidad multiplicativa contra los costos de distribución uniforme.
- Costos con distribución normal con estacionalidad multiplicativa contra los costos de distribución uniforme
- Costos con distribución uniforme con estacionalidad multiplicativa contra los costos de distribución normal

De acuerdo con la comparación de costos de los planes agregados se identificó el menor costo. Se prosigue a observar las gráficas correspondientes de la demanda y los costos de los planes agregados, obtenidas de cada distribución de probabilidad, así como con estacionalidad multiplicativa, interpretando el comportamiento de cada una de ellas.

3. Resultados

En este apartado se presentan los resultados obtenidos de las estrategias de planeación agregada con una demanda estocástica y bajo una simulación Monte Carlo. Se obtuvieron distintos resultados debido a la aleatoriedad de la demanda donde el tamaño de muestra proporcionó el número replicas necesarias para el cálculo del promedio de los costos que se presentan en la tabla 2 con su respectivo plan agregado y distribución de probabilidad. La comparativa de estos resultados se presenta de la siguiente manera: la distribución normal contra la distribución normal con estacionalidad multiplicativa observamos que los costos de distribución con estacionalidad multiplicativa son mayores en los 3 planes. La distribución uniforme contra la distribución uniforme con estacionalidad multiplicativa, en este caso sucede lo mismo en la distribución con estacionalidad multiplicativa los costos son mayores. La distribución normal contra la distribución uniforme, en este caso observamos que los gastos mayores son con la distribución uniforme. La distribución normal con estacionalidad multiplicativa y la distribución uniforme con estacionalidad multiplicativa observamos que en el “plan 1, producción exacta, mano de obra variable” es mayor el costo de la distribución normal, en los costos del “plan 2, fuerza de trabajo constante, inventario e inventario agotado variable” y “plan 3, mano de obra baja y constante, subcontratación” es mayor la distribución uniforme. La distribución normal contra la distribución uniforme con estacionalidad multiplicativa, todos los costos de los planes con distribución normal son menores. Y, por último, la distribución normal con estacionalidad multiplicativa contra distribución uniforme, los costos son menores con distribución uniforme.

Tabla 2 Comparativa de los costos promedio.

Costos de los planes agregados	Distribución normal	Distribución normal con estacionalidad	Distribución uniforme	Distribución uniforme con estacionalidad
Costo Plan 1	\$171595	\$182643	\$174132	\$181438
Costo Plan 2	\$157192	\$165799	\$163886	\$167874
Costo Plan 3	\$153970	\$162611	\$161028	\$164969

La representación gráfica de un conjunto de datos permite visualizar información compleja. Esto ayuda a identificar variables que dependen unas de otras, conteniendo información importante. Las gráficas permiten interpretar mejor la

información reforzando la conclusión de esta investigación. Es por ello que se grafica la demanda aleatoria y los costos totales de las estrategias para interpretar su comportamiento, evolución y determinar componentes de la demanda como: tendencia, estacional, cíclico, autocorrelación o aleatorio. Posteriormente se graficó el promedio de la demanda aleatoria definido por el cálculo de tamaño de muestra. Se presentan las figuras 2 y 3 de los gráficos de los promedios de la demanda aleatoria con su respectiva distribución en un tiempo de 6 meses representando en el eje X, y en el eje Y el pronóstico de la demanda con su distribución de probabilidad, se interpreta el comportamiento de cada gráfica.

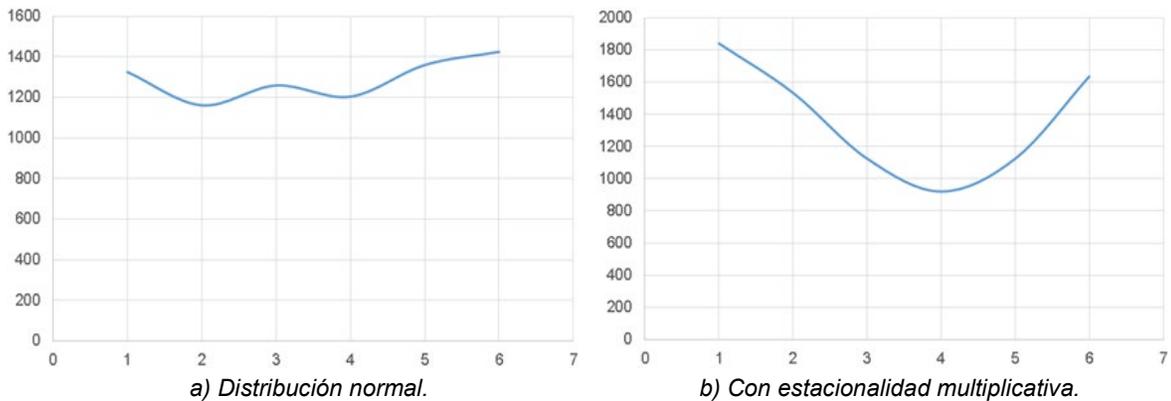


Figura 2 Demanda con distribución normal.

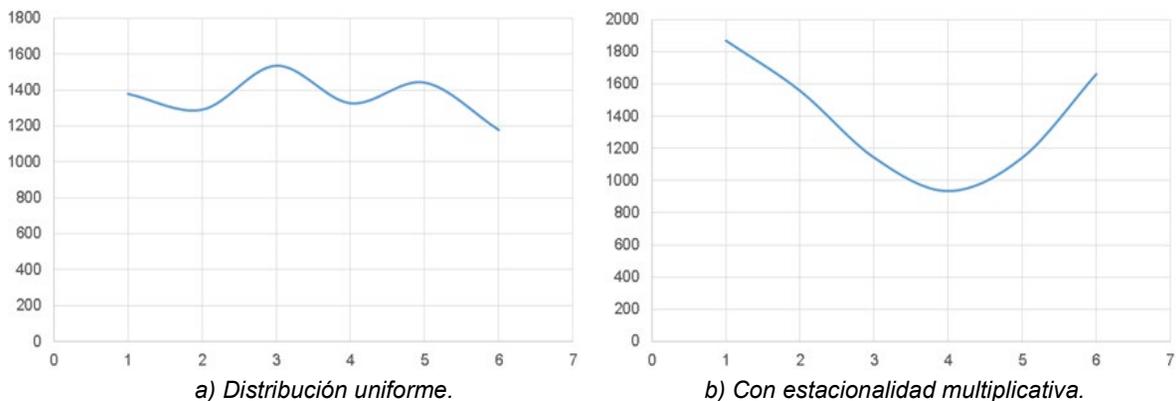


Figura 3 Demanda con distribución uniforme.

Las gráficas de la demanda con estacionalidad multiplicativa en su distribución tienen un comportamiento similar, arrojando la menor venta en el mes de abril y la mayor venta el mes de enero, teniendo una tendencia de curva S. Por otro lado, la

demanda con distribución normal muestra tendencia en su comportamiento y proyectando un escenario con ventas altas. Finalmente, la distribución uniforme también tiene un comportamiento aleatorio, pero con ventas proyectadas sumamente bajas. Se presentan las gráficas del promedio de costos (Figuras 4, y 5) cada una de las estrategias de planeación agregada con su respectiva distribución para poder interpretar su comportamiento como se muestra a continuación. En eje de la X se presentan las estrategias como “plan 1, producción exacta, mano de obra variable”, “plan 2, fuerza de trabajo constante, inventario e inventario agotado variable” y “plan 3, mano de obra baja y constante, subcontratación” y en el eje Y los costos obtenidos.

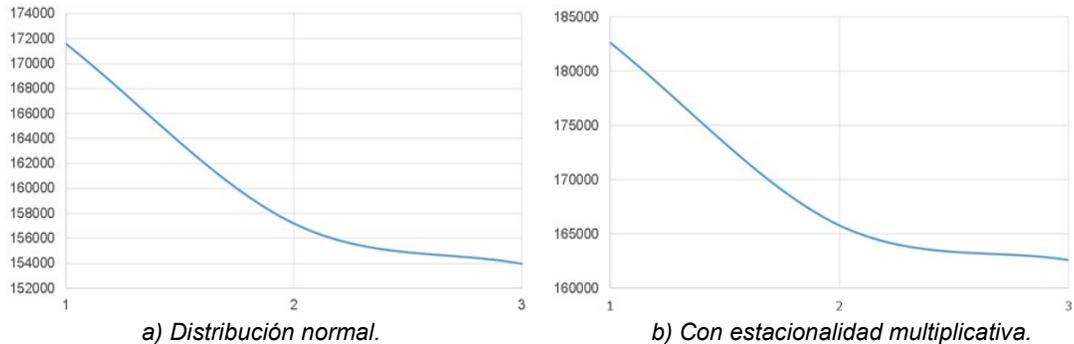


Figura 4 Costos con distribución normal.

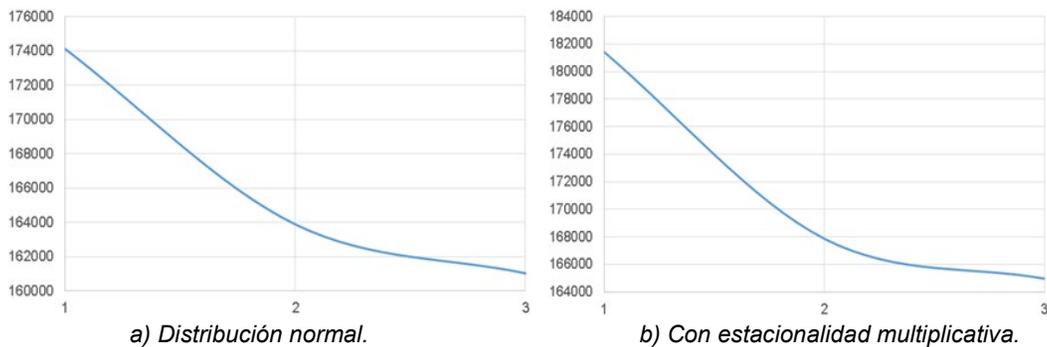


Figura 4 Costos con distribución uniforme.

En los cuatro gráficos se observa que tienen el mismo comportamiento exponencial, inicialmente tienden a subir y bajar constantemente en cada costo del plan, siendo el “plan 1, producción exacta, mano de obra variable” el costo más alto en las cuatro distribuciones no siendo viable en este caso el contratar y despedir trabajadores

dependiendo las necesidades de la demanda, el “plan 2, fuerza de trabajo constante, inventario e inventario agotado variable” este plan se describe por sí mismo siendo un costo intermedio en las distribuciones, y por último el “plan 3, mano de obra baja y constante, subcontratación” que contiene los costos más bajos en todas las distribuciones, siendo más viable que los otros planes, llevando a cabo la subcontratación cuando la demanda lo requiere, eliminando costos de despido, ya que la fuerza de trabajo es constante y con un costo de tiempo normal.

4. Discusión

En las gráficas de la demanda todas tienen un distinto comportamiento, pero solo dos no presentan información útil, respecto a la tendencia esperada. El promedio de los costos de los planes nos proporciona un panorama más amplio respecto a la decisión que debemos tomar para hacer uso del plan con menor costo. Por otro lado, las gráficas de los promedios de los costos de cada plan, nos brinda una información más específica y certera sobre cual plan es mejor. Por último, la aleatoriedad de la demanda nos da un panorama muy amplio sobre la decisión de futuros acontecimientos que afecten la estabilidad de la empresa y poder tener información sobre qué plan que proporcione un menor costo.

5. Conclusiones

De acuerdo con la demanda aleatoria bajo un supuesto de comportamiento de distribución normal, se proyectaría el menor costo en los planes agregados brindando una buena información de ventas futuras a mediano plazo. Sin embargo, en una situación real la demanda podría aplicarse a cualquier comportamiento probabilístico de la demanda. En este caso utilizamos la distribución normal y distribución uniforme además de que adaptamos el método estacional multiplicativo el cual proporciona un pronóstico estacional en cada distribución, generando nuevos costos totales, siendo capaz de analizar los planes agregados, brindando un costo determinado y en base a ello tomar la decisión del plan que brinda menor costo. En este caso la estrategia de planeación agregada con menor costo fue el “plan 3, mano de obra baja y constante, subcontratación”, esta estrategia es similar a la de

persecución ya que no es una estrategia pura sino una mixta, la subcontratación es necesaria para ajustar las fluctuaciones en la demanda cubriendo la demanda mínima esperada y subcontratando para la producción adicional. La subcontratación brindara parte de las actividades internas de una empresa y responsabilidades sobre las decisiones a otra compañía. Esto podría mejorar el desempeño operativo, la administración y control, los costos fijos se vuelven variables. Un inconveniente son los contratos con sueldos bajos y menos prestaciones, considerando la subcontratación como una manera de evadir los contratos laborales. Esta estrategia puede conllevar a alterar el ritmo de la producción sino se tiene un control de la demanda, generando retrasos en el bien o servicio que se esté ofreciendo al cliente, siendo un reto para el gerente de producción coordinar estas actividades y hacer uso de la subcontratación a tiempo. Para fines de esta investigación, el análisis de reducción de costos de producción, la estrategia “plan 3, mano de obra baja y constante, subcontratación” cumple con el requerimiento de menor costo total de producción en comparación de los otros planes agregados. Esto quiere decir que las estrategias de planeación agregada también son adaptadas a las organizaciones dependiendo sus necesidades ya que no todas las estrategias pueden aplicarse en una organización. Las variables de mano de obra, inventario, tiempo extra y ocioso, cumplieron con su objetivo al presentar la estrategia “plan 3, mano de obra baja y constante, subcontratación”, ya que proporciono el menor costo total de producción, repercutiendo en la minimización de costos de estas variables. Por otro lado, la gráfica que nos da una tendencia con mayor estabilidad en la demanda es la distribución normal. La distribución también proporciona el menor costo de los planes agregados en comparación con las demás distribuciones y estacionalidad en su comportamiento, esto brinda una mejor comprensión para la toma de decisiones, ya sean en el presente o prevenir situaciones no previstas. En esta investigación no solo se presenta la información del plan que origina el menor costo, también a partir de ello se puede planear las capacidades de producción, manejo de inventario, fuerza de trabajo y tiempo extra. Esta información es favorable tanto para la demanda del cliente, y de la empresa que permite utilizar sus recursos de manera eficiente, haciendo un ahorro de gastos, así como evitar incumplimientos de clientes.

6. Bibliografía y Referencias

- [1] Aboozar, J., Jian-Bo, Y., Dong-Ling, X., Ardalan, F., & Gholamreza, J. (2019). Evaluating the performance of aggregate production planning strategies under uncertainty in soft drink industry. *Journal of Manufacturing Systems*, 50. doi:10.1016/j.jmsy.2018.12.009
- [2] Ata, M. Y. (2007). A convergence criterion for the Monte Carlo estimates. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 15, 237–246. doi:10.1016/j.simpat.2006.12.002
- [3] Babak Rasmi, S. A., Kazan, C., & Turkay, M. (2019). A multi-criteria decision analysis to include environmental, social and cultural issues in the sustainable aggregate production plans. *Computers & Industrial Engineering*, 132, 348-360. doi:10.1016/j.cie.2019.04.036
- [4] Chang, P. C. (2017). A simulation analysis of the impact of finite buffer storage on manufacturing system reliability. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 70, 149–158. doi:10.1016/j.simpat.2016.10.006
- [5] Chase, R. B., Jacobs, F. R., & Aquilano, N. J. (2006). *Administración de operaciones, producción y cadena de suministros* (Duodécima ed.). México: McGraw-Hill.
- [6] García Dunna, E., García Reyes, H., & Cárdenas Barrón, L. E. (2013). *Simulación y análisis de sistemas con ProModel* (Segunda ed.). México: Pearson.
- [7] Jang, J., & Chung, B. D. (2020). Aggregate production planning considering implementation error: A robust optimization approach using bi-level particle swarm optimization. *Computers & Industrial Engineering*, 142(2). doi:10.1016/j.cie.2020.106367
- [8] Render, B., Stair, R. M., & Hanna, M. E. (2012). *Métodos cuantitativos para los negocios* (Undécima ed.). México: Pearson Educación.
- [9] Walpole, R. E., Myers, R. H., Myers, S. L., & Ye, k. (2012). *Probabilidad y estadística para ingeniería y ciencias* (Novena ed.). México: Pearson.