

Análisis de decisiones en la asignación de productos a distintas líneas de ensamble

Ulises Mercado Valenzuela¹, Oliverio Cruz Mejía¹

¹ Facultad de Estudios Superiores Aragón UNAM, Ingeniería Industrial, Av. Universidad Nacional S/N, Bosques de Aragón, 57171 Cd. Nezahualcóyotl, Méx., ulisesmv@comunidad.unam.mx, oliverio.cruz.mejia@comunidad.unam.mx

Resumen

Este trabajo se enfoca en el problema que enfrenta un programador de la producción entre diversas líneas de ensamble potenciales. Se muestra una metodología de análisis de decisiones, cuya finalidad fundamental es formalizar la decisión tomada de la información disponible sobre líneas potenciales de ensamble y distintos productos. Una vez que se hayan definido indicadores para las cualidades se utilizan diagramas de influencia que auxilian en el cálculo de la asignación deseada del vínculo programador de la producción-línea de ensamble dada. Se desarrolla previamente el cálculo de la producción esperada de las distintas asignaciones y la distribución de líneas de producción potenciales entre los distintos productos, de tal forma que se minimice el costo total mediante la utilización de un algoritmo de programación entera binaria. Considerando los resultados anteriores se desarrolla una asignación óptima como resultado del proceso anterior mediante el algoritmo de asignación de Solver con la ayuda de sus tres motores de solución óptima (Evolutivo, lineal y no lineal). Una vez desarrollada la metodología se propone un caso de estudio hipotético que servirá como sustento potencial para futuros casos prácticos siendo el principal hallazgo la creación de una nueva metodología para el estudio y análisis de casos en los cuales un programador de la producción se encuentre en la disyuntiva de tomar la decisión relacionada con cual será la mejor línea de ensamble a asignar considerando un número limitado de productos.

Palabras clave— Análisis, decisiones, ensamble, productos

Abstract

This work focuses on the problem faced by a production scheduler between various potential assembly lines. A decision analysis methodology is shown, whose fundamental purpose is to formalize the decision made from the information available on potential assembly lines and different products. Once indicators for the qualities have been defined, influence diagrams are used to assist in the calculation of the desired allocation of the scheduling link of the given production-assembly line. The calculation of the expected production of the different assignments and the distribution of potential production lines among the different products is previously developed, in such a way that the total cost is minimized using a binary integer programming algorithm. Considering the previous results, an optimal assignment is developed because of the previous process using the Solver assignment algorithm with the help of its three optimal solution engines (Evolutionary, linear and nonlinear). Once the methodology has been developed, a hypothetical case study is proposed that will serve as potential support for future practical cases, the main finding being the creation of a new methodology for the study and analysis of cases in which a production programmer is in the dilemma of making the decision related to which will be the best assembly line to assign considering a limited number of products.

Keywords— Assembly, analysis, decisions, products.

I. INTRODUCCIÓN

Este trabajo se enfoca en una situación ordinaria dentro de las empresas de manufactura. En el ámbito de la programación en piso el programador de la producción tiene identificadas las distintas líneas de ensamble a las cuales es factible asignar su producto a ser manufacturado, el cual se denominará como “línea de ensamble potencial”. Por lo que deberá dividir el conjunto de líneas de ensamble potenciales entre sus distintos productos con la finalidad de maximizar el volumen producido y que permita al mismo tiempo minimizar sus costos inherentes [1].

Cuando esta división se implementa, se considera que se cuenta con cierto conocimiento acerca del programador (Experiencia en el área, conocimiento del producto, conocimiento de la línea de producción, etc.) y las líneas de ensamble (tasa de producción, línea de ensamble nueva, línea de ensamble vieja, etc.), pero en la práctica es difícil considerar

un modelo que considere la mejor asignación programador de la producción-línea de ensamble.

A. Análisis de decisiones.

Este trabajo presenta una metodología sustentada en el análisis de decisiones [1],[2],[3], como herramienta de innovación en los procesos bayesianos de decisión que implican la elección de distintas opciones en base a la determinación de funciones de distribución de probabilidad [4].

B. Programación de la producción.

En el ámbito de la programación de la producción existen diversos estudios relacionados con la asignación de distintos productos a distintas líneas de ensamble [5]-[9], mientras que en [10], presentan un estudio relacionado con la asignación y balanceo de productos en sistemas de líneas de ensamble móviles, utilizando modelos matemáticos de etapas múltiples, en lo relacionado a modelos enfocados a líneas de producción con una sola línea de productos disponibles [10]

proponen un modelo basado en un caso de estudio para el ensamble de bicicletas de un solo modelo, asimismo [11], proponen la configuración de una plataforma modular para ensamble y desensamble de un solo producto con características modulares.

En lo concerniente a las asignaciones a líneas de producción bajo condiciones de incertidumbre, los estudios se enfocan en líneas de producción con paro permanente y con paro intermitente, en lo relacionado con paro permanente [12], presenta un modelo de paro permanente en condiciones de incertidumbre que se enfoca básicamente en el tiempo discreto de un modelo de producción de múltiples etapas que aplica a dos incertidumbres importantes, la tasa de producción de cada etapa de producción, y la demanda de los productos finales, por otro lado en los relacionado al paro intermitente, [13], desarrolla métricas de confiabilidad relacionadas con dos tipos de incertidumbre en el mantenimiento intermitente de líneas de producción, el primero se enfoca cuando la demanda no es conocida y el segundo cuando la tasa de producción es incierta.

II. METODOLOGÍA

Se abordará en esta parte una descripción general de la metodología a utilizar, dando mayores detalles en el caso de estudio a desarrollar. En primer lugar, se considera que se cuenta con un programador de la producción en piso que tiene un conjunto de líneas de ensamble potenciales a ser utilizadas entre sus distintos productos, por lo que se propone de acuerdo con [1] 6 etapas para llevar a cabo este proceso de decisión, aclarando que existe una clara diferenciación relacionada con los incisos D, E y F, ya que [1] se enfoca en rutas logísticas y su optimización mediante el empleo de un algoritmo incremental basado en el del agente viajero y en este caso se utiliza el algoritmo de asignación húngaro[14], para optimizar el proceso .

- A. Determinar las cualidades del programador de la producción que sean relevantes a la línea de producción a utilizar (experiencia en el área, conocimiento del producto, conocimiento de la línea de producción, etc.), si existiese el caso de que alguna de estas cualidades no contase con alguna métrica en lo particular, sería recomendable asignarle una lo suficientemente sustentable para darle claridad al modelo propuesto.
- B. Definir las características de las líneas de producción a utilizar y que influyan en el resultado de la asignación como lo es (tasa de producción, línea de producción en paro por mantenimiento, línea de producción disponible con paros escalonados, etc.), al igual que en el punto A, será necesario desarrollar escalas para aquellas cualidades de las líneas de producción que no puedan ser medidas de forma directa.
- C. Desarrollar un modelo que permita predecir el resultado de asignar un cierto producto a una línea de producción dada. De inicio el modelo contará con las cualidades de la línea de producción y del programador en piso, y con la utilización de distribuciones de probabilidad condicionales en estos niveles relacionados con sus

cualidades, se obtendrá el valor esperado del costo asociado a este proceso, en este trabajo se hace uso de diagramas de influencia para la asignación de los escenarios óptimos. Se propone que las distribuciones de probabilidad se basen en registros estadísticos sobre las cualidades de los programadores contratados y su curva de aprendizaje en distintos tópicos de la asignación de productos y por otro lado sobre el desempeño de las líneas de producción. Si fuese el caso que no se contasen con estos registros se puede recurrir a distribuciones de probabilidad subjetivas elicítadas, en base a la experiencia que el programador de la producción tenga, por lo que será necesaria que estos datos se obtengan de tal forma que se asegure que los valores obtenidos cuenten con la legitimidad requerida (como puede ser la rueda de probabilidad), por lo que la coherencia de las probabilidades obtenidas debe ser verificada [15].

- D. Calcular las asignaciones que minimicen el costo total esperado. Los valores esperados de los costos asociados a las posibles asignaciones programador-línea de producción, se realizan mediante la utilización de un modelo de programación entera binaria, con el objeto de minimizar el valor del costo total, sujeto a un número límite 3 líneas de ensamble asignadas al programador, se resuelve mediante un motor de búsqueda con el uso de un motor de búsqueda de Solver de Excel, se hace un comparativo con los otros motores de búsqueda que involucra modelos evolucionarios y no lineales y se realiza un comparativo.
- E. Si se considera que no es conveniente debido a que alguno o algunos de los programadores de la producción involucrados queda sin asignación se puede disminuir el monto a 2 o 1 asignación por la línea de ensamble.
- F. Si ninguno de los escenarios se considera conveniente debido a que afecta el costo mínimo se puede aumentar al máximo límite de 4 líneas de ensamble, considerante que solo se cuenta con cuatro programadores de la producción.

A. Cualidades del programador de la producción.

Las cualidades de los programadores de la producción se enfocan en dos dimensiones:

1. Conocimiento del producto. (C_p)
2. Conocimiento de la línea de ensamble. (CL_p)

Las dos cualidades pueden tomar valores que pueden ser Alto (A) ó Bajo (B)

B. Cualidades de las líneas de producción

Los factores caracterizar en una línea de ensamble son:

1. LID (línea de ensamble disponible) , que puede ser $LID = DI_a$ (Disponibilidad inmediata) o $LID = SDI_a$ (Sin disponibilidad inmediata)
2. Si al elegir una línea de ensamble potencial se requieren diversos elementos tales como estado de la línea, antigüedad, tasa de producción, operarios etc. Por lo que en función de esa premisa se puede considerar definición de la elección de la línea de ensamble potencial (D_{et}) la

cual puede ser hecha con precisión ($D_{et} = P$) o con imprecisión ($D_{et} = I$)

- Costo asociado al producto asignado a la línea de producción (C_i).

III. DESARROLLO DE UN CASO DE ESTUDIO

El propósito de esta sección es mostrar la metodología a trabajar en un problema hipotético en donde en una empresa un programador de la producción debe decidir cómo distribuir los cuatro productos en seis distintas líneas de ensamble. Este caso de estudio tiene propósitos ilustrativos, lo que se presenta en el desarrollo del caso de estudio y los resultados finales son la apreciación directa de los autores.

A. Modelo de resultado de la asignación potencial producto-línea de ensamble

Para este caso son utilizados diagramas de influencia para desarrollar el costo esperado de la asignación potencial producto-línea de ensamble dada. En los diagramas (Figura 1 y 2), los cuadros son decisiones y los círculos variables con incertidumbre [16],[1]. En el caso de que una flecha se dirija de un cuadro a un círculo, la decisión del primero tiene efecto en la función de distribución de probabilidad de la variable del segundo. Si alguna flecha se conecta con dos círculos, la distribución de probabilidad resultante de la variable estará condicionado por la función de distribución de probabilidad de la variable inicial.

El proceso inicia con el programador eligiendo a la línea de ensamble potencial, lo que origina una solicitud de orden de ensamble. Si se lleva a cabo puede suceder que se concrete la elección o no. Derivado de lo anterior se presentan dos modelos, uno para líneas de ensamble potenciales nuevas y líneas potenciales de ensamble viejas.

B. Línea de ensamble potencial nueva

Se muestra el diagrama de influencia para obtener el valor esperado del costo asociado a la asignación del producto dado, mostrándose en la Fig.1, los cuales identifican a las variables. La probabilidad de que la elección del programador de la producción resulte en una solicitud de orden de ensamble ($T_v=K$) depende del conocimiento de la línea de ensamble (CL_p) y de línea de ensamble disponible (LID), por lo que se encuentra condicionada por ambos factores $P_{T_v}(T_v|LID, CL_p)$. Las probabilidades planteadas indican que tiene más probabilidad obtener una solicitud de orden de ensamble, si la línea de ensamble está disponible y se tiene conocimiento de la línea de ensamble.

Si se solicita una orden de ensamble ($T_v=K$), esta se concretará en la elección de una línea de ensamble ($R_v=K$) con la probabilidad dada por $P_{R_v}(R_v|D_{et}, C_p)$. lo cual indica que estará condicionada por el conocimiento del producto (C_p) adaptado a la línea de ensamble potencial (D_{et}). Si la elección de la línea de ensamble se lleva a cabo con precisión ($D_{et}=P$), en función del estado de la línea, antigüedad, tasa de producción, operarios etc, será más fácil llevar a cabo la elección propuesta, por el contrario, si la solicitud se lleva a

cabo con imprecisión, ($D_{et}=I$), dependerá de la habilidad del programador para sortear estos inconvenientes.

Finalmente, si se lleva a cabo la elección de la línea de ensamble ($T_v=K$), el costo asociado al producto asignado a la línea de ensamble (C_i), puede tomar los valores m_1 y m_2 con probabilidades $p_{C_i}(m_1)$ y $p_{C_i}(m_2)$ de forma respectiva.

Al asignar una línea de ensamble potencial a un producto con C_p y CL_p dados, el valor del costo asociado a esta elección potencial $E(C_i|C_p, CL_p)$, se puede asignar mediante las ecuaciones 1 a la 6, con los cuales se asigna la notación E_{NODO} y p_{NODO} los cuales indican el valor esperado y la distribución de probabilidad del nodo mostrado en la Fig.1

$$E_{C_i}[C_i]=m_1 * p_{C_i}(m_1) + m_2 * p_{C_i}(m_2) \tag{1}$$

$$E_{R_v}[C_i|D_{et}=P, CL_p]=p_{R_v}(K|P, CL_p) * E_{C_i}[C_i] \tag{2}$$

$$E_{R_v}[C_i|D_{et}=I, CL_p]=p_{R_v}(K|I, CL_p) * E_{C_i}[C_i] \tag{3}$$

$$E_{D_{et}}[C_i|CL_p]=p_{D_{et}}(P) * E_{T_v}[C_i|D_{et}=P, CL_p] + p_{D_{et}}(I) * E_{T_v}[C_i|D_{et}=I, CL_p] \tag{4}$$

$$p(T_v=K|C_p) = p_{LID}(DI_a) * p_{T_v}(K|DI_a, C_p) + p_{LID}(SDI_a) * p_{T_v}(K|SDI_a, C_p) \tag{5}$$

$$E[C_i|CL_p, C_p]=E_{T_v}[C_i|CL_p, C_p]=p(T_v=K|CL_p) * E_{D_{et}}[C_i|CL_p] \tag{6}$$

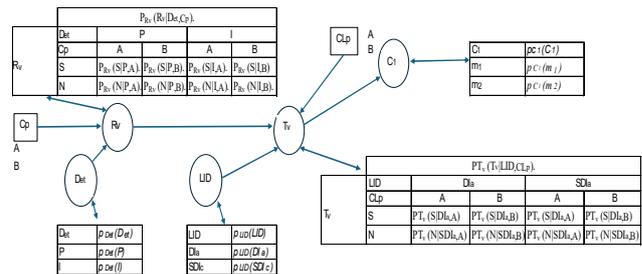


Fig. 1 Diagrama de influencia del valor esperado del costo asociado a la asignación del producto a la línea de ensamble nueva (elaboración propia)

C. Línea de ensamble potencial vieja

En este caso se desarrolla la asignación a una línea de ensamble vieja y ya conocida con la cuál es más probable trabajar debido al grado de familiaridad que puede tener el programador con la misma. El diagrama de influencia se muestra en la Fig. 2, la variable MP_v indica el mismo programador de producción que ha hecho la asignación el cual puede enfocarse en dos vertientes $MP_v=S_1$ línea de ensamble nueva asignada ó $MP_v=N_1$ línea de ensamble vieja asignada. El valor de MP_v y la línea de ensamble disponible (LID), condicionan la probabilidad asignada $P_{T_v}(T_v|LID, MP_v)$, como resultado de la elección del programador de una solicitud de ensamble.

Si el resultado de la elección del programador es una solicitud de ensamble ($T_v=K$), la variable K_1 , indica que tan similar es su elección a otras que haya hecho con anterioridad. Si la nueva elección es similar a otras que haya realizado ($K_1=A_1$) la probabilidad de llevar a cabo la elección viene dada por $P_{R_v}(K)$. Si por el contrario no existe similitud con

elecciones anteriores ($K_i=B_1$), dependerá de la habilidad del programador para llevar a cabo la mejor elección posible.

La evaluación de la información contenida en la Fig. 2 permitirá evaluar el valor esperado del costo asociado a esta elección potencial $E(C_i|MP_v, CL_p)$, en función de las ecuaciones mostradas.

$$E_{C_i}[C_i]=m_1 * p_M(m_1) + m_2 * p_M(m_2) \tag{7}$$

$$E_{R_v}[C_i|K_i=A_1]=p_{R_v}(K) * E_{C_i}[C_i] \tag{8}$$

$$E_{R_v}[C_i|K_i=B_1, D_{et}=P, CL_p]=p_{R_v}(K|P, CL_p) * E_{C_i}[C_i] \tag{9}$$

$$E_{R_v}[C_i|K_i=B_1, D_{et}=I, CL_p]=p_{R_v}(K|I, CL_p) * E_{C_i}[C_i] \tag{10}$$

$$E_{D_{et}}[C_i|K_i=B_1, CL_p]=p_{D_{et}}(P) * E_{R_v}[C_i|K_i=B_1, D_{et}=P, CL_p] + p_{D_{et}}(I) * E_{R_v}[C_i|K_i=B_1, D_{et}=I, CL_p] \tag{11}$$

$$p(T_v=K|MP_v)=p_{LID}(D_{ia}) * p_{T_v}(K|D_{ia}, MP_v) + p_{LID}(SD_{ia}) * p_{T_v}(K|SD_{ia}, MP_v) \tag{12}$$

$$E[C_i|MP_v, CL_p]=E_{T_v}[C_i|MP_v, CL_p]=p(T_v=K|MP_v) * E_{D_{et}}[C_i|K_i=B_1, CL_p] \tag{13}$$

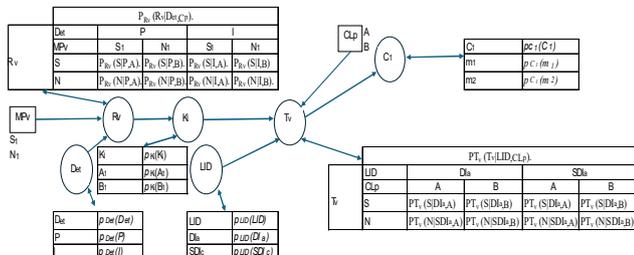


Fig. 2 Diagrama de influencia del valor esperado del costo asociado a una elección potencial.

D. Determinación de las asignaciones que minimizan el costo total de la elección realizada

Considerando que $E(i, j)$ el valor esperado de la elección realizada si se asigna el producto i a la línea de ensamble j . El cálculo de $E(i, j)$ dependerá si la línea de ensamble nueva ha sido asignada o no.

$$E(i, j) = E[C_i|CL_p, C_p] \tag{14}$$

Si el producto i ha sido asignado a la línea de ensamble nueva

$$E(i, j) = E[C_i|MP_v, CL_p] \tag{15}$$

En donde CL_p y C_p representan el conocimiento del producto y el conocimiento de la línea de ensamble j , y si el producto i ha sido asignado a la línea de ensamble vieja, la variable MP_v indica que la línea de ensamble nueva ya fue asignada. De esta forma las funciones de distribución de probabilidad utilizadas en el cálculo de los valores esperados $E[C_i|CL_p, C_p]$ y $E[C_i|MP_v, CL_p]$, (ecuaciones 1-6 y 7-13), están determinadas por el producto i dado. Si $X(i, j)$, toma el valor 1, cuando el producto potencial i se asigna a al línea de ensamble j y cero en caso contrario, el costo total esperado (C_i) de un conjunto de asignaciones, en un problema que cuenta con N_p productos y N_v líneas de ensamble potenciales, se lleva a cabo de la siguiente forma:

$$C_i = \sum_{j=1}^{N_v} \sum_{i=1}^{N_p} E(i, j) * X(i, j) \tag{16}$$

Se introducen las restricciones correspondientes a que cada línea de ensamble potencial se le asigne un solo producto y que a cada producto se le asigne un máximo de $N_{v, MAX}$ líneas de ensamble potenciales y de esta forma calculando con antelación los valores $E(i, j)(i=1, \dots, N_v, j=1, \dots, N_p)$, de acuerdo con las ecuaciones (14) y (15), las asignaciones que minimizan C_i se resuelven solucionando el siguiente problema de programación entera.

$$\text{Max}_{X(i, j)} [C_i = \sum_{i=1}^{N_v} \sum_{j=1}^{N_p} E(i, j) * X(i, j)] \tag{17}$$

Sujeto a

$$\sum_{j=1}^{N_p} X(i, j) = 1 \text{ para } i=1, \dots, N_v \tag{18}$$

$$\sum_{i=1}^{N_v} X(i, j) \leq N_{v, MAX} \text{ para } j=1, \dots, N_p \tag{19}$$

Y con $X(i, j) = 0, 1$

La solución dada al problema de programación lineal entera viene dada por las ecuaciones (17) a la (19), proporciona los conjuntos de líneas de ensamble potenciales asignadas.

E. Desarrollo del algoritmo de asignación

El algoritmo de asignación a proponer consiste en buscar la asignación que minimice el costo de la asignación de cada programador de la producción a cada línea de ensamble potencial, el modelo de asignación propuesto descansa en los siguientes pasos general para lo cual se proponen los siguientes pasos:

1. Determinar cuál es el elemento que contiene el costo mínimo de la fila i , de la matriz de costos propuesta, por lo que se procede a restarlo de los demás elementos, $i=1, 2, 3, \dots, n$.
2. Para la matriz anterior se debe determinar cuál es el elemento que representa el costo mínimo de la columna j , posteriormente se procede a restarlo de los demás elementos con $j=1, 2, 3, \dots, m$.
3. De todas las asignaciones con cero resultantes, tratar de determinar la asignación factible que contribuya a obtener el costo mínimo total

IV. RESULTADOS

En esta parte se concluye con la asignación de valores a los parámetros del modelo en cuestión. La asignación de valores considera fines ilustrativos, no obstante, para aplicaciones directas es indispensable el conocimiento a detalle de quien programa la actividad [17][18],[1].

Las cualidades del programador de la producción para asignar los productos a las líneas de ensamble se indican en la Tabla I. En la Tabla II se muestran las líneas de ensamble potenciales y las distribuciones de probabilidad asociadas al costo total esperado (C_i) de un conjunto de asignaciones, línea de ensamble potencial (D_{ct}) y línea de ensamble disponible (LID). La columna asignación previa, indica si el producto ha sido asignado previamente a la línea de ensamble.

TABLA I
CUALIDADES DEL PROGRAMADOR DE LA PRODUCCIÓN

Producto	Conocimiento del producto. (C _p)	Conocimiento de la línea de ensamble. (CL _p)
1	B	A
2	B	A
3	A	B
4	B	A
5	A	A

TABLA II
CUALIDADES DE LAS LÍNEAS POTENCIALES DE ENSAMBLE

Línea de ensamble potencial	m ₁ (\$)	m ₂ (\$)	p _M (m ₁)	p _M (m ₂)	p _{LID} (DI _a)	p _{Det} (P)	Asignación previa
1	25	22	0.2	0.8	0.63	0.27	si
2	24	11	0.5	0.5	0.18	0.63	si
3	35	10	0.04	0.96	0.9	0.63	no
4	12	16	0.35	0.65	0.72	0.9	si
5	17	24	0.57	0.43	0.27	0.72	no
6	10	22	0.13	0.87	0.27	0.9	si

La Tabla III, muestra la línea de ensamble potencial que ya había sido asignada previamente, con la probabilidad de que la elección se haga con precisión p_{Det}(P), y de darse el caso que la nueva elección sea similar a otras que haya realizado, la probabilidad de llevar a cabo la elección viene dada por P_{Rv}(K).

TABLA III
CUALIDADES DE LÍNEAS POTENCIALES DE ENSAMBLE POTENCIALES QUE HAN SIDO ASIGNADAS PREVIAMENTE

Línea de ensamble potencial	Producto que fue asignado previamente	p _{Det} (P)	p _{Rv} (K)
1	-	0.81	0.72
2	2	0.36	0.54
4	5	0.81	0.36
6	3	0.18	0.28

La distribución de probabilidad relacionada con la elección que haya hecho el programador de la producción de una línea de ensamble nueva viene dada en la Tabla IV y los que lo hayan hecho en una línea de ensamble vieja en la Tabla V.

TABLA IV
VALORES DE PR_v (R_v|D_{ET},C_p).

	Det		P		I	
	C _p	A	B	A	B	
R _v	S	0.8	0.2	0.8	0.8	
	N	0.2	0.8	0.2	0.2	

TABLA V
VALORES DE PR_v (R_v|D_{ET},MP_v).

	Det		P		I	
	MP _v	S1	N1	S1	N1	
R _v	S	0.3	0.4	0.6	0.8	
	N	0.7	0.6	0.4	0.2	

La Tabla VI, indica la probabilidad de que la elección del programador de la producción resulte en una orden de ensamble viene dada por PT_v (T_v|LID,CL_p).

TABLA VI
PROBABILIDAD DE QUE LA ELECCIÓN RESULTE EN UNA ORDEN DE ENSAMBLE

	PT _v (T _v LID,CL _p).				
	LID	DI _a		SDI _a	
		CL _p	A	B	A
T _v	S	0.2	0.8	0.2	0.9
	N	0.8	0.2	0.8	0.1

La Tabla VII se muestran los valores de E(i,j) para todas las asignaciones dadas de los distintos productos y líneas de ensamble disponibles.

TABLA VII
VALORES DE LAS ASIGNACIONES CORRESPONDIENTES A CADA VALOR ESPERADO

Programador de la producción	Líneas de ensamble					
	1	2	3	4	5	6
1	91	19	4	20	16	9
2	98	133	46	55	34	31
3	8	119	37	62	28	41
4	25	84	6	2	50	57

En la Tabla VIII se muestra el resultado de las asignación con el uso del algoritmo de programación entera binaria de las distintas combinaciones de E(i,j) para un límite de asignación de 3 líneas de ensamble.

TABLA VIII
ASIGNACIONES DE LAS DIFERENTES VALORES ESPERADOS, CON LÍMITE DE 3 LÍNEAS

	Línea 1	Línea 2	Línea 3	Línea 4	Línea 5	Línea 6
Programador 1	0	1	0	0	1	1
Programador 2	0	0	0	0	0	0
Programador 3	1	0	0	0	0	0
Programador 4	0	0	1	1	0	0

Derivado de la Tabla VIII, se obtiene la mejor asignación posible al costo mínimo que en total equivale a un costo mínimo de \$60, si nos vamos por rubro, el programador 1 se le asignan \$55, el programador 2 no tiene asignación, en lo

correspondiente al programador 3 el total equivale a un costo mínimo de \$8, y finalmente el programador 4 tiene un costo total de \$8, utilizando el motor de búsqueda de Solver de Excel.

Por otro lado, si se utiliza el motor de búsqueda no lineal de Solver de Excel se obtienen los mismos resultados que en la Tabla VIII.

De la misma forma el motor de búsqueda Evolutivo de Solver, se obtienen resultados similares a los mostrados en la Tabla VIII.

En la Tabla IX se muestra el resultado de las asignación con el uso del algoritmo de programación entera binaria de las distintas combinaciones de $E(i,j)$ para un límite de asignación de 2 líneas de ensamble.

TABLA IX
ASIGNACIONES DE LAS DIFERENTES VALORES ESPERADOS, CON LÍMITE DE 2 LÍNEAS

	Línea 1	Línea 2	Línea 3	Línea 4	Línea 5	Línea 6
Programador 1	0	1	0	0	0	1
Programador 2	0	0	0	0	0	0
Programador 3	1	0	0	0	1	0
Programador 4	0	0	1	1	0	0

Derivado de la Tabla IX, se obtiene la mejor asignación posible al costo mínimo que en total equivale a un costo de \$72, si nos vamos por rubro, el programador 1 se le asignan \$28, el programador 2 no tiene asignación, en lo correspondiente al programador 3 el total equivale a un costo mínimo de \$33, y finalmente el programador 4 tiene un costo total de \$4, utilizando el motor de búsqueda de Solver de Excel.

Por otro lado, si se utiliza el motor de búsqueda no lineal de Solver de Excel se obtienen los mismos resultados que en la Tabla IX.

De la misma forma el motor de búsqueda Evolutivo de Solver, se obtienen resultados similares a los mostrados en la Tabla IX.

En la Tabla X se muestra el resultado de las asignación con el uso del algoritmo de programación entera binaria de las distintas combinaciones de $E(i,j)$ para un límite de asignación de 1 línea de ensamble.

TABLA X
ASIGNACIONES DE LAS DIFERENTES VALORES ESPERADOS, CON LÍMITE DE 1 LÍNEA

	Línea 1	Línea 2	Línea 3	Línea 4	Línea 5	Línea 6
Programador 1	0	0	0	0	0	0
Programador 2	0	0	0	0	0	0
Programador 3	0	0	0	0	0	0
Programador 4	0	0	0	0	0	0

Derivado de la Tabla X, se obtiene la mejor asignación posible al costo mínimo que en total equivale a un costo de \$0, si nos vamos por rubro, no existen asignaciones por lo que esta opción.

Por otro lado, si se utiliza el motor de búsqueda no lineal de Solver de Excel se obtienen los mismos resultados que en la Tabla X.

De la misma forma el motor de búsqueda Evolutivo de Solver, se obtienen resultados similares a los mostrados en la tabla 10.

En la Tabla XI se muestra el resultado de las asignación con el uso del algoritmo de programación entera binaria de las distintas combinaciones de $E(i,j)$ para un límite de asignación de 4 líneas de ensamble.

TABLA XI
ASIGNACIONES DE LAS DIFERENTES VALORES ESPERADOS, CON LÍMITE DE 4 LÍNEAS

	Línea 1	Línea 2	Línea 3	Línea 4	Línea 5	Línea 6
Programador 1	0	1	1	0	1	1
Programador 2	0	0	0	0	0	0
Programador 3	1	0	0	0	0	0
Programador 4	0	0	0	1	0	0

Derivado de la Tabla XI, se obtiene la mejor asignación posible al costo mínimo que en total equivale a un costo de \$58, si nos vamos por rubro, el programador 1 se le asignan \$48, al programador 2 no se le asignan, en lo correspondiente al programador 3 el total equivale a un costo mínimo de \$8, y finalmente el programador 4 tiene un costo total de \$2, utilizando el motor de búsqueda de Solver de Excel.

Por otro lado, si se utiliza el motor de búsqueda no lineal de Solver de Excel se obtienen los mismos resultados que en la Tabla X.

De la misma forma el motor de búsqueda Evolutivo de Solver, se obtienen resultados similares a los mostrados en la tabla X.

Por lo que al analizar las cuatro posturas es conveniente considerar que por un lado la asignación que involucra una sola línea de ensamble se descarta definitivamente, por lo que el producto que involucra 4 líneas de ensamble porque representa un costo de \$58, que es el más económico y óptimo.

V. CONCLUSIÓN

En este trabajo se muestra una metodología que propone la decisión concerniente a la elección que puede desarrollar un programador de la producción hacia distintas líneas de ensamble, en las cuales se enfrenta a aspectos de singular relevancia, como lo es el conocimiento que tiene del producto y de la línea de ensamble. La importancia de esta propuesta se basa en el hecho de incorporar a la toma de decisiones de los programadores de la producción la información que en base a su experiencia y nivel de aprendizaje se tenga a la mano, si bien esta experiencia es importante, también lo es el hecho de contar con información cuantitativa que permita apoyar a los tomadores de decisión con el propósito de consolidarlas.

Derivado de la naturaleza poco predecible de los procesos de manufactura, se apoyan los datos con la información proveniente de la incertidumbre, de los cuales es indispensable incorporar funciones de distribución de probabilidad con el rango lo más amplio posible de tal forma que se puedan abarcar todas las probabilidades a considerar, por lo que se incorpora el uso de diagramas de influencia, los cuales permitan interrelacionar las dependencias entre todos aquellos parámetros inciertos con las decisiones involucradas.

Se desarrolló la aplicación de la metodología propuesta a un problema hipotético en donde se ven involucrados 4 programadores de la producción y 6 líneas de ensamble. La información presentada relacionada a los programadores de la producción y las líneas de ensamble, así como los datos numéricos y las distribuciones de probabilidad asociadas consideran un carácter ilustrativo. No obstante, si el programador de la producción no considera que existan equivalencias entre los productos y las líneas de ensamble a considerar, es posible desarrollar indicadores asociados a las distribuciones de probabilidad que permitan apreciar la elección de la línea de ensamble asociada más adecuada. Por el contrario, si se considera que los valores obtenidos de las distribuciones de probabilidad asociadas se obtienen por la mera opinión del programador de la producción será necesario contar con la certeza de los datos proporcionados y realizar un análisis de coherencia para garantizar en la medida de lo posible la consolidación de la decisión tomada.

REFERENCIAS

- [1] Chew-Hernández, M. L., Viveros-Rosas, L., & Velázquez-Romero, V. "Metodología basada en análisis de decisiones para distribuir geográficamente una fuerza de ventas". *Ingeniería, investigación y tecnología*, 19(3), 2018, pp. 255-266.
- [2] Howard R.A. "Decision Analysis: Practice and promise". *Management Science*, volumen 34 (número 6), 1988, pp. 679-695.
- [3] Edwards W., Miles R.F., Von-Winterfeldt D. "Advances in Decision Analysis", New York, Cambridge University Press, 2007, pp. 13-32
- [4] Clemen, R. T., & Winkler, R. L. "Combining probability distributions from experts in risk analysis". *Risk analysis*, 19,1999, pp. 187-203.
- [5] Schmid, N. A., Limère, V., & Raa, B. "Mixed model assembly line feeding with discrete location assignments and variable station space". 2021, *Omega*, 102, 102286
- [6] Maganha, I., Silva, C., Klement, N., dit Eynaud, A. B., Durville, L., & Moniz, S. "Hybrid optimisation approach for sequencing and assignment decision-making in reconfigurable assembly lines". *IFAC-PapersOnLine*, 52(13),2019, pp. 1367-1372.
- [7] Dolgui, A., Kovalev, S., Kovalyov, M. Y., Malyutin, S., & Soukhal, A. "Optimal workforce assignment to operations of a paced assembly line". *European Journal of Operational Research*, 264(1),2018, pp. 200-211.
- [8] Sipsas, Konstantinos; Nikolakis, Nikolaos; Makris, Sotiris. Dynamic assembly planning and task assignment. En *Advanced Human-Robot Collaboration in Manufacturing*. Cham: Springer International Publishing, 2021. pp. 183-210.
- [9] Elmaraghy, Hoda, et al. Evolution and the future of manufacturing systems. *CIRP Annals*, 2021, vol. 70, no 2, pp. 635-658.
- [10] Buckhorst, A. F., Huettemann, G., Grahn, L., & Schmitt, R. H. (2019). "Assignment, sequencing and location planning in line-less mobile assembly systems". In *Tagungsband des 4. Kongresses Montage Handhabung Industrieroboter, 2019*, pp. 227-238. Springer Berlin Heidelberg.
- [11] Kuo, Y., Chen, Y. P., & Wang, Y. C. "Operator assignment with cell loading and product sequencing in labour-intensive assembly cells—a case study of a bicycle assembly company". *International Journal of Production Research*, 56(16),2018, pp. 5495-5510.
- [12] Hanafy, M., & ElMaraghy, H. "Modular product platform configuration and co-planning of assembly lines using assembly and disassembly". *Journal of manufacturing systems*,42,2017, pp. 289-305.
- [13] Tang, C. S. The impact of uncertainty on a production line. *Management Science*, 36(12), 1990, pp. 1518-1531.
- [14] Kuhn, Harold W. A tale of three eras: The discovery and rediscovery of the Hungarian Method. *European Journal of Operational Research*, 2012, vol. 219, no 3, pp. 641-651.
- [15] Li, Y., Peng, R., Kucukkoc, I., Tang, X., & Wei, F. "System reliability optimization for an assembly line under uncertain random environment". *Computers & Industrial Engineering*, 146,2020,106540.
- [16] Morgan, M. G., Henrion, M., & Small, M. *Uncertainty: a guide to dealing with uncertainty in quantitative risk and policy analysis*. Cambridge university press, 1990.
- [17] Abbas, A. E., & Howard, R. A. "Attribute dominance utility". *Decision Analysis*, 2(4), 2005, pp.185-206.
- [18] Lindley, D. V. "Understanding uncertainty". John Wiley & Sons, 2013, pp 240-250.