Determinación del Método Óptimo de Operaciones de Ensamble Bimanual con el Algoritmo de Dijkstra (o de Caminos Mínimos)

María J. Cardona⁽¹⁾, Omar D. Castrillón⁽²⁾ y Héctor A. Tinoco⁽¹⁾

(1) Departamento de Mecánica y producción, Grupo de Diseño y Desarrollo Industrial, Universidad Autónoma de Manizales, Manizales – Colombia. (e-mail: mcardona@autonoma.edu.co; htinoco@autonoma.edu.co)

(2) Universidad Nacional de Colombia, Sede Manizales, Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Departamento de Ingeniería Industrial, Campus la Nubia, CP 170001, Manizales - Colombia. (e-mail: odcastrillong@unal.edu.co)

Recibido Sep. 15, 2016; Aceptado Nov. 10, 2016; Versión final Ene. 10, 2017, Publicado Ago. 2017

Resumen

En este estudio se propone una metodología computacional para aumentar la productividad a través del análisis de las operaciones optimizando el método de trabajo. Esto se enmarca en la ingeniería de métodos y está basada en grafos y optimización de trayectorias. Se diseñó un caso de estudio para simular un proceso de ensamble bimanual y así probar la metodología propuesta. Todas las formas de ensamble fueron convertidas en nodos que fueron obtenidos de las combinaciones de las piezas y ponderaciones de distancia entre ellas. El problema fue solucionado con el algoritmo de Dijkstra, también llamado algoritmo de caminos mínimos. La solución óptima del método fue comparada con el tiempo de operación de diez métodos seleccionados aleatoriamente de todos los posibles. Los resultados mostraron diferencias significativas entre el método óptimo y los seleccionados, encontrándose aumentos en la productividad de hasta 20% con el método óptimo.

Palabras clave: optimización; algoritmo de Dijkstra; ingeniería de métodos; ensamble bimanual

Determination of the Optimal Method of Bimanual Assembly Operations with Dijkstra Algorithm (or Shortest Path)

Abstract

In this study, a numerical methodology is proposed to increase productivity through the analysis of operations in order to optimize the working method. This study belongs to the so-called methods engineering and is based on graphs and route optimization paths. A case study was designed to simulate a bimanual assembly process and test the proposed methodology. All forms of assembly were converted into graphs that were obtained from the combinations of parts and weights distance between them. The problem was solved with Dijkstra's algorithm. The optimum solution method was compared with the operation time of ten randomly selected alternatives of all possible assembly methods. The results showed significant differences between the optimal method and those selected, finding an increasing in the productivity of up to 20% with the optimal proposed method.

Keywords: optimization; Dijkstra algorithm; methods engineering; bimanual assembly

INTRODUCCIÓN

Uno de los factores que afecta la productividad del trabajo, son los métodos que se utilizan en las operaciones de ensamble. Dentro de estos procesos siempre se busca mejorar el tiempo de producción a través de la eliminación de actividades que no generan valor, como también a través de la redistribución del puesto trabajo (Jadhav et al., 2014). Las actividades adicionales producen costos operativos y como consecuencia una disminución de la rentabilidad y productividad (Tinoco et al., 2015). Existen diferentes herramientas para aumentar la productividad desde las etapas de diseño; y en el uso de estas se deben considerar los siguientes aspectos; métodos, procesos, herramientas, equipos y habilidades de manufactura (Niebel y Freivalds, 2014). Básicamente debe emplearse un procedimiento general de resolución de problemas que consiste en: 1) seleccionar el proyecto, 2) obtener y presentar los datos, 3) analizar los datos, 4) diseño del método ideal, 5) presentar y establecer el método, 6) desarrollar un análisis del trabajo, 7) establecer tiempos estándar, 8) dar seguimiento al método (Kanawaty, 1996).

Para buscar un método de trabajo ideal, el analista de métodos debe estudiar imparcialmente todas las maneras posibles de alcanzar el objetivo de ensamblaje, sin limitarse a intentar una simple mejora del método existente (Barnes, 1963). El método encontrado puede ser validado con análisis de tiempos y movimientos para verificar el tiempo de ensamblaje, el cual es un indicador crucial para medir el rendimiento. Las herramientas de los analistas de tiempos y movimientos son técnicas manuales que están basadas en la utilización de los principios de economía de movimientos, técnicas de interrogación, diligenciamiento de diagramas de procesos, entre otros (Tinoco et al., 2015). Todos estos aspectos evidencian la eficiencia de las operaciones. Sin embargo, el uso de herramientas computacionales permite minimizar el costo operativo de todo el proceso de mejora, ya que pocos ensayos deben ser realizados en la práctica. Estudios recientes muestran que la aplicación de técnicas de optimización ayudan a incrementar la eficiencia de los procesos (Ni et al., 2015; Anandan et al., 2016; Myers et al., 2016; Peña Cabrera et al., 2006). Por ejemplo; Los sistemas inteligentes o expertos han encontrado un lugar y han apoyado las actividades de fabricación como la programación de la producción, el enrutamiento, diseño de maquinaria, el estudio del trabajo, equilibrio de líneas de producción; impactando las prácticas industriales de la producción, control y gestión de los procesos (Ngai et al., 2014; Wong et al. 2005). También, la programación entera mixta, los algoritmos heurísticos y algoritmos genéticos han mostrado su verdadera utilidad en el balanceo de líneas de montaje con estaciones de multi-trabajadores (Kellegoz y Toklu, 2015). Sin embargo, la investigación de operaciones como problema de optimización presenta muchos desafíos y por lo tanto las aplicaciones computacionales son estudiadas actualmente (Bermudez-Colina, 2011; Myers et al., 2016).

El algoritmo de Dijkstra permite determinar la ruta mínima de un grafo ponderado en sus aristas. Existen diversas aplicaciones y algunas son de gran importancia en las diferentes áreas del conocimiento (Torrubia y Terrazas, 1995); tales como el control del tráfico, planeación de rutas de transporte y aplicaciones para hallar cualquier tipo de problema que involucre trayectorias o variables análogas (Fraustro, 2003). En este estudio se propone un enfoque para determinar el método óptimo de ensamble entre diferentes secuencias de operaciones de un proceso de ensamble bimanual. La metodología se basa en el diseño de un grafo que representa las posibilidades de ensamble de un producto considerando las condiciones de diseño de una estación de trabajo donde se realiza el proceso. Para aplicar la metodología propuesta se parte de una estación de trabajo con algunas restricciones de diseño y de método tomados de la aplicación de los principios de economía de movimiento. Todas las restricciones del proceso son tenidas en cuenta en la construcción del grafo, de otra forma el grafo que se obtiene será diferente, con mayor o menor cantidad de nodos. El algoritmo de optimización de Dijkstra es utilizado para hallar la ruta mínima que corresponde al menor costo en los recorridos que realizan las manos al ejecutar las operaciones. Para probar la metodología propuesta, un caso de estudio fue diseñado con condiciones y características especiales como; estaciones de trabajo con un solo trabajador, operaciones manuales realizadas con ambas manos, posición de trabajo sentado, recorridos de las manos en un plano horizontal, operaciones de ensamble y distribución simétrica.

METODOLOGÍA COMPUTACIONAL

En esta sección serán mostrados los tópicos generales de los métodos aplicados en este estudio: Teoría de grafos y Algoritmo de optimización de Dijkstra. Luego se explica cómo convertir un puesto de trabajo en un grafo de ruta. Finalmente se

Teoría de grafos

Un grafo es una estructura matemática que representa relaciones que se definen por un conjunto de nodos unidos por líneas o flechas y por lo general estas contienen información (Coto, 2003). Los grafos son una

poderosa herramienta para modelar objetos y establecer relaciones entre ellos; estos son usados en investigación de operaciones, matemáticas discretas, combinatorias y análisis de redes (Kai et al., 2014). Los grafos son simples cuando hay una sola arista uniendo dos nodos; de lo contrario es llamado multi-grafo, y es llamado pseudo-grafo cuando incluye algún lazo en las relaciones entre nodos. Frecuentemente las aristas tienen algún tipo de información asociada, generalmente un valor numérico, esto hace que el grafo sea ponderado o pesado como se muestra en la Fig.1. Un grafo F consiste en un conjunto de nodos N y un conjunto de aristas A de tal manera que cada arista $A_i, \forall i = 1, 2, 3, 4, \dots, m$ se une a un par de nodos $N_p = \{n_j, n_k, | \forall p = 1, 2, 3, 4, \dots, m\}$; así $F = \{N|A\}$ donde, $N = \{n_1, n_2, n_3, \dots, n_n\}$ y $A = \{a_1, a_2, a_3, \dots, a_m\}$ para m aristas, donde los pesos w de las aristas $W = \{w_1, w_2, w_3, \dots, w_m | w_m | i \in R\}$.

Fig. 1: Grafo dirigido

Un ejemplo de un grafo es mostrado en la Fig. 1, el cual presenta 7 nodos y 11 aristas, cada una con una ponderación w . La representación matemática de un grafo es establecida mediante el siguiente mapa de conexión (tabla 1); por simplificación usaremos el grafo de la Fig. 1. Desde la tabla 1 diferentes representaciones matemáticas son dadas dependiendo de las aplicaciones.

Tabla 1: Nodos y Conexiones

Nodos	Conexiones
N ₁	a ₁ , a ₂ , a ₃
N ₂	a ₁ , a ₄ , a ₁₁
N ₃	a ₂ , a ₅
N ₄	a ₃ , a ₄ , a ₆
N ₅	a ₆ , a ₇
N ₆	a ₄ , a ₈
N ₇	a ₅ , a ₇ , a ₈ , a ₁₀ , a ₁₁

Algoritmo de optimización de Dijkstra

El problema de la trayectoria mínima es uno de los problemas básicos en la teoría de grafos y este puede ser resuelto vía el algoritmo de Dijkstra (Kleinberg and Tardos, 2005). Para ilustrar una solución con Dijkstra, consideremos el siguiente problema de rutas representado en un grafo como $G = \{N|A, W\}$; donde N son los nodos, A las aristas y W los pesos de las aristas. El grafo G tiene como nodo origen $n_1 \in n$, y cada arista es unida por un par de nodos, tal que $N_p = \{n_j, n_k | \forall p = 1, 2, 3, 4, \dots, m\}$. Los pesos de las aristas están dados por la función peso $W = \{w_1, w_2, w_3, \dots, w_m | w_i \in [0, \infty]\}$ y para cada w_p son asociados pares N_p . Podemos definir que el costo de una ruta S puede ser determinado identificando los nodos de la ruta; como $b_s = n_1 n_2 \dots n_k$; y el costo del camino es la suma de las ponderaciones de las aristas que están asociadas en b_s ; tal que $x_s = w_m + w_n \dots + w_p$. Por consiguiente cualquier ruta admisible b_s puede ser categorizada como:

$$d_s(n_1, n_r) = \{x_s: n_1 \rightarrow n_r | n_r \in n, \forall s = 1, 2, \dots, t\}, \quad (1)$$

donde t es el número de trayectorias que pueden ser resueltas.

Para encontrar los caminos d_s , se parte del nodo inicial y se consideran únicamente los nodos a los cuales se puede llegar directamente. Continuando por el camino se consideran los nodos a los que se puede llegar por medio del nodo anterior y desde el nodo inicial. Así sucesivamente hasta llegar al nodo final. Cada trayectoria de nodos posee un costo asociado, el cual se va almacenado y evaluando para encontrar el costo mínimo.

La solución del conjunto de la ec. (1) es dada por:

$$d = \min\{d_s(p, n_r) | \forall s = 1, 2, \dots, t\}, \quad (2)$$

La ecuación (2) significa que dado un conjunto de trayectorias d_s , la solución óptima es la mínima suma de las ponderaciones del conjunto $d_s(p, n_r)$; la cual corresponde a una ruta definida en b_s como la ruta mínima.

CASO DE ESTUDIO: ENSAMBLE DE UN TREN DE JUGUETE

En esta sección se muestra un caso de estudio para aplicar la metodología computacional propuesta de esta investigación.

Convirtiendo un puesto de trabajo en un grafo dirigido

En esta sección se describe la representación de una operación de ensamble bimanual en un grafo dirigido. Consideremos un grafo $g = \{n|A, w\}$ como una representación de todas las posibles formas de ensamblaje de un producto. En g , los nodos constituyen los estados en que se encuentra el pre-ensamble en determinado momento, y las aristas determinan las conexiones ponderadas por los pesos w . Los pesos son definidos como las distancias recorridas por las manos según el estado que representa cada procedimiento de ensamble; e.g. dada la pieza A fija; y B móvil, el estado representa el procedimiento de traer B hacia A; y el peso es definido por la distancia que corresponde el movimiento de las manos para ejecutar la acción. Por lo tanto, cada peso $w_i, \forall i = 1, 2, 3, 4, \dots, m$ es calculado con las distancias asociadas a cada estado. Luego, n_1 representará el primer nodo n_1 de g que corresponde al primer estado donde una pieza está fija en la estación de trabajo y donde las manos estarán en la posición inicial y final de la operación. Dentro de la estación de trabajo cada pieza tiene una localización espacial $p_j = \{x_j, y_j | \forall x, y \in \mathbb{R}, j = 1, 2, 3, \dots, r\}$ siendo r el número de piezas. Luego, los pesos se calculan por cada arista del grafo, según como se mueven las manos en los recorridos que realizan desde el área de ensamble (pieza fija) hasta las piezas y desde las piezas hasta el área de ensamble, como sigue:

$$w_i = [d(p_i, p_j) + d(p_j, p_i)] \cdot a \quad (3)$$

Donde a representa la bimanualidad, cuando las piezas están ubicadas de forma simétrica y opuesta; Las distancias son calculadas con la norma euclidiana como

$$d(p_i, p_j) = \sqrt{(x_j - x_i)^2 + (y_j - y_i)^2} \quad (4)$$

Una vez calculados todos los parámetros del puesto de trabajo; estos pueden ser introducidos a un algoritmo de optimización de rutas en sus formas estándar; para nuestro estudio es Dijkstra. Para simular un proceso de ensamble bimanual; se seleccionó como producto de ensamble un tren de juguete. Se establecieron condiciones limitantes para el ensamble del tren y el diseño del puesto de trabajo; como: tipo de operación de ensamble bimanual, recorridos de las manos (sobre un plano (x, y) de la mesa de trabajo), configuración de la operación (isla de trabajo) y posición del operador (sentado).

El tren cuenta con 18 piezas individuales listadas y estructuradas en la tabla 2. Las dimensiones corresponden a la proyección de área rectangular en la cual una pieza puede estar contenida en la zona de trabajo, estas son demarcadas en la Fig. 2. Todos los elementos del tren están señalados y delimitados en la zona de trabajo, los cuales se encuentran dentro del área máxima de operación; definidas por la extensión de los brazos. Además de las piezas del tren, fueron adicionadas zonas de ubicación de las herramientas y un dispositivo de sujeción que cumple con la función de fijación del pre-ensamble. Esto con el fin de evitar que las manos estén ocupadas mientras se realiza el proceso. El dispositivo de sujeción fue diseñado de tal manera que sujeta el producto firmemente para facilitar el cambio de orientación mediante rotaciones.

El diseño del puesto de trabajo se elaboró considerando los principios de economía de movimientos o guía para el diseño de operaciones manuales. Se aplicaron el 80% los principios, el 20% restante no eran requeridos debido a la naturaleza de la operación. Las áreas máximas y normales de trabajo fueron dibujadas geométricamente mediante un arco de 180° con origen de coordenadas en $(115,0)mm$ para la mano derecha y $(-115,0)mm$ para la mano izquierda y con un radio de $550mm$. Esto simula el alcance del brazo y antebrazo extendidos apoyado en la mesa de trabajo. Adicionalmente, un arco de 180° con origen de coordenadas en $(150,0)mm$ para la mano derecha y $(-150,0)mm$ para la mano izquierda con radio de $330mm$; esta área representa el alcance del antebrazo extendido apoyado en la mesa de trabajo, para ambas manos; como se evidencia en la Fig. 2.

Tabla 2: Partes del tren de juguete

Nombre	Cantidad	Dimensiones (mm)	Tren de juguete
1. Chasis izquierdo (CI)	1	135 X 99
2. Chasis derecho (CD)	1	135 X 99	
3. Llantas traseras (LLTD, LLTI)	2	Ø 55	
4. Llantas delanteras (LLDD, LLDI)	2	Ø 36	
5. Techo (Tec)	1	65 X 7	
6. Tubo de escape (Tub)	1	Ø 36	
7. Parachoques trasero (Para Tra)	1	6 X 43	
8. Parachoques delantero (Para Del)	1	8 X 88	
9. Tornillos (Tor)	8	Ø 15

Fig. 2: Diseño del puesto de trabajo

Cabe resaltar que la mayoría de los elementos necesarios para llevar a cabo la operación, se encuentran dentro del área normal de trabajo, es decir lo más cerca posible del operario o del área de ensamble y ningún elemento se encuentra por fuera del área máxima. Con esta distribución se garantiza que el operario no realice movimientos innecesarios e incómodos al tener que alcanzar objetos a una distancia en la que hay mayores esfuerzos musculares. Además, fueron consideradas las medidas antropométricas en el diseño del lugar de trabajo, de manera que estas se ajustarán adecuadamente al operador, para garantizar mayor eficiencia en la operación y menos fatiga en él.

El grafo dirigido que representa todas las rutas posibles de ensamble del tren, consiste en la unión de 212 nodos, 311 aristas y 10 etapas, para un total de 96 posibilidades de ensamblaje. En el grafo, el nodo número uno, representa el estado en el cual todas las piezas están sin ensamblar. El nodo número uno está conectado únicamente con el dos, por medio de una arista que lleva un peso de 834.3 mm. Este nodo representa el estado en el cual el chasis izquierdo y el chasis derecho son unidos y ubicados en el dispositivo de sujeción. Posteriormente, el nodo número dos se encuentra conectado con el tres, cuatro, cinco, seis y siete; los cuales representan las rutas en las que puede continuar ensamblándose el resto de las piezas; considerando las restricciones de ensamble del tren. El grafo continúa con los siguientes nodos alternando posibilidades de ensamble de las 16 piezas restantes, hasta llegar al nodo 212, que identifica el producto terminado. Un esquema simplificado del grafo es mostrado en la Fig. 3.

Los pesos de las aristas son determinados con las distancias calculadas desde el punto origen hasta el punto destino; los cuales simbolizan los recorridos que realizan las manos. Estos son determinados con la Ecuación (3); usando los puntos coordenados correspondientes a cada pieza (tabla 3). Los puntos p_1 hasta

p_{16} se encuentran ubicados en el segundo cuadrante del plano de coordenadas $x - y$ mostrado en la Fig. 2; y los puntos $\bar{p}_1$ hasta $\bar{p}_{16}$ se encuentran en el primer cuadrante.

Fig. 3: Esquema del grafo de ensamble.

Tabla 3: Puntos coordenados de ubicación de los elementos en la estación de trabajo

Punto/Coordenada	Pieza	x	y
P_1 y $\bar{P}_1$	Punto de ensamble de las llantas traseras	-26.5	135
P_2 y $\bar{P}_2$	Punto de alcance del chasis izquierdo	-234.5	1475
P_3 y $\bar{P}_3$	Punto de ensamble del chasis	-26.5	163
P_4 y $\bar{P}_4$	Punto de ensamble de las llantas delanteras	-26.5	188
P_5 y $\bar{P}_5$	Punto de alcance de las llantas traseras	-234.5	258
P_6 y $\bar{P}_6$	Punto de alcance de los tornillos de las llantas traseras	-312	258
P_7 y $\bar{P}_7$	Punto de alcance de las llantas delanteras	-234.5	319
P_8 y $\bar{P}_8$	Punto de alcance de los tornillos de las llantas delanteras	-302	319
P_9 y $\bar{P}_9$	Punto de alcance de los parachoques	-2345	390
P_{10} y $\bar{P}_{10}$	Punto de alcance de los tornillos de los parachoques	-332	390
P_{11} y $\bar{P}_{11}$	Punto de alcance del tubo de escape y el techo	-390	319
P_{12} y $\bar{P}_{12}$	Punto de ensamble de los parachoques	-65	163
P_{13} y $\bar{P}_{13}$	Punto de alcance de los tornillos del tubo y el techo	-472	319
P_{14} y $\bar{P}_{14}$	Punto de ensamble del tubo de escape y el techo en el área de ensamble	-26	163
P_{15} y $\bar{P}_{15}$	Punto de ensamble de las llantas traseras y delanteras	-216	137
P_{16} y $\bar{P}_{16}$	Punto de alcance de las herramientas	-335	120

Con toda la información colectada (pesos, distancias y $b_s = n_i n_j \dots n_k$, donde $k = 96$) del proceso se definió la matriz de entrada M para el algoritmo Dijkstra; donde $M \in \mathbb{R}^{212 \times 212}$. Los índices de la matriz se fijaron relacionando las interacciones entre los nodos y valor correspondientes al peso de cada arista. Si la conexión no existe la ponderación es cero en cada arista.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La trayectoria óptima del problema planteado en la sección caso de estudio fue determinada con el algoritmo de Dijkstra, la solución óptima es dada por la siguiente secuencia de nodos $b_0 = \{1, 2, 4, 10, 24, 51, 106, 198, 203, 209, 212\}$ con un peso total de 11060 mm, el cual significa la distancia total

recorrida por ambas manos, es decir 5530 mm por cada mano aproximadamente. Este valor es dividido por la simetría del puesto de trabajo. Podemos observar gráficamente la secuencia de actividades del método óptimo en la Fig.4.

Fig. 4: Método óptimo de ensamble del tren de juguete determinado por Dijkstra

Para comparar los resultados del método óptimo; diez métodos se seleccionaron aleatoriamente para este propósito, los estados son mostrados en la Tabla 4. Estos representan un 10.42 % del total de los métodos. Para las pruebas experimentales, 15 repeticiones fueron realizadas en una mesa de trabajo para determinar los tiempos de ensamble de cada método, en total 165 pruebas fueron realizadas. Los resultados son mostrados en la Fig. 5; allí podemos observar los tiempos de ensamble de cada método con su respectiva desviación estándar. La primera barra de color gris oscuro representa el método óptimo, donde el tiempo de ensamble arrojó una media de 50 s en el tiempo total de la operación; y este tiempo representó el mejor tiempo de ensamble comparado con los otros métodos.

Para observar las variaciones de tiempo y distancia, las diferencias con respecto al método óptimo fueron calculadas y los resultados son mostrados en la Fig.6. Podemos observar que la variación con respecto a los recorridos realizados, no presenta grandes diferencias porcentuales entre el método óptimo y los métodos seleccionados. Sin embargo, con respecto al tiempo, la variación si es significativa. Ya que se presentan variaciones máximas del 25% entre el tiempo del método óptimo y los demás. Para ilustrar la importancia de este resultado; el siguiente ejercicio de producción es planteado; consideremos una producción diaria, asumiendo una operación de ensamble de trenes en una jornada de trabajo de 8 horas, con una hora de descanso. Esto arroja un total de 25200 segundos de operación en cada jornada; para este tiempo los cálculos de producción son mostrados en la Tabla 5. Si analizamos la productividad del método óptimo; con respecto a los otros métodos, podemos identificar que se alcanzan disminuciones en la productividad de hasta 20%; solo modificando la secuencia de tareas en el proceso de ensamble. Esto significa que en el peor caso se dejarían de producir hasta 98 unidades en un día, ya que se utiliza el 25% más del tiempo para la operación; y en el mejor caso la producción cae 6%. Esto muestra una oportunidad para determinar el método óptimo de ensamble con herramientas computacionales, ya que la selección de un método adecuado puede impactar la productividad.

Tabla 4: Métodos seleccionados para las pruebas experimentales

E/M	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9	E10	E11
1	Piezas desensambladas	C1 y CD	GHI - Tub y Tec	Para Del Tra	Tor Para Del Tra	LL DI TI	Tor LL DI, Tor LL TI	Tor Tub, Tor Tec	GHD	LL TD, LL DD	Tor LL TD, Tor LL DD
2			GVF LL Del	LL Tra	Tor LL Del	Tor LL Tra	GHI	Para Del Tra	Tor Para Del Tra	Tub Tec	Tor Tub Tec
3			GHI LL DI TI	Para Del Tra	Tor LL DI TI	Tor Para Del Tra	Tub Tec	Tor Tub Tec	GHD	LL TD DD	Tor LL TD DD
4			GHI - Tub y Tec	Tor Tub Tec	Para Del Tra	LL DI TI	Tor LL DI TI	Tor Para Del Tra	GHD	LL TD DD	Tor LL TD DD
5			GVF LL Tra	LL Del	Tor LL Del	Tor LL Tra	GHI	Para Del Tra	Tub Tec	Tor Tub Tec	Tor Para Del Tra
6			GVF LL Tra	Tor Tra	LL Del	Tor Del	GHI	Para Del Tra	Tor Para Del Tra	Tub Tec	Tor Tub Tec
7			GVF LL Del	Tor Del	LL Tra	Tor LL Tra	GHI	Para Del Tra	Tub Tec	Tor Para Del Tra	Tor Tub Tec
8			GHI Para Del Tra	Tor Para Del Tra	LL DI TI	Tub Tec	Tor LL DI TI	Tor Tub Tec	GHD	LL TD DD	Tor LL TD DD
9			GHI LL DI TI	Tub Tec	Tor LL DI TI	Tor Tub Tec	Para Del Tra	Tor Para Del Tra	GHD	LL TD DD	Tor LL TD DD
10			GHI - Tub y Tec	Para Del Tra	Tor Tub Tec	LL DI TI	Tor LL DI TI	Tor Para Del Tra	GHD	LL TD DD	Tor LL TD DD
Dijkstra			GVF LL Tra	Tor LL Tra	LL Del	Tor LL Del	GHI	Tub Tec	Para D T	Tor Para Del Tra	Tor Tub Tec

Simbología: E (Estado), M (Método), GH (giro horizontal), I (izquierdo), D (Derecho).

Fig.5: Comparación de tiempo de ensamble con los diferentes métodos seleccionados aleatoriamente

Tabla 5: Análisis de productividad y eficiencia de diferentes métodos con respecto al método óptimo

Tiempo/Método	M-Dijkstra	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10
Tiempo promedio (s)	50.67	63.2	58	62.27	60	54	54	54	60	61	60.1
Producción día	497	399	436	405	419	464	466	468	418	416	419
Disminución productividad con relación al tiempo	0%	20%	12%	19%	16%	7%	6%	6%	16%	16%	16%
% Eficiencia con relación al tiempo	100%	80%	88%	81%	84%	93%	94%	94%	84%	84%	84%

Fig. 6: Variación porcentual entre el tiempo y la distancia

Una regresión lineal simple fue determinada; para demostrar que el tiempo total de ensamble y la distancia recorrida por las manos presentan alguna correlación. La regresión lineal es graficada en la Fig. 7, el modelo lineal presenta un coeficiente de correlación de $R^2 = 0.83$. Esto evidencia que existe una relación directamente proporcional entre las variables tiempo total y distancia recorrida por las manos. La prueba *Fisher* arroja un valor de 52.62, con una significancia de 4.79×10^{-5} , lo que ratifica la veracidad del modelo. Los parámetros del modelo $V_d = \beta_0 + \beta_1 V_t$, son $\beta_1 = 0.27$, $\beta_0 = -0.28$; donde V_d es la variación porcentual de la distancia recorrida por la manos y V_t es la variación porcentual del tiempo total de ensamble. Los resultados de la regresión muestran que estudiar los recorridos de las manos afecta directamente el tiempo de ensamble con una ponderación mayor. Esto significa que la variación porcentual de la distancia representa el 27% de la variación del tiempo en este proceso.

Fig. 7: Correlación variación porcentual del tiempo y distancia

CONCLUSIONES

En este artículo, fue propuesta una metodología para determinar el método óptimo de operaciones involucradas en un ensamble bimanual respecto a las distancias recorridas. La metodología está basada en el uso de grafos para resolver el problema planteado con algoritmos de optimización, en nuestro estudio aplicamos el algoritmo de Dijkstra para este propósito. La metodología fue validada con un caso de estudio diseñado con el ensamble de un tren de juguete. Los resultados mostraron que el método óptimo determinado por el algoritmo de Dijkstra, presentó el tiempo mínimo de ensamble con respecto a otros métodos de ensamble seleccionados aleatoriamente. Adicionalmente, fue demostrado que existe una correlación lineal entre la distancia total recorrida por la manos y el tiempo de ensamblaje; mostrando que el tiempo un parámetro más sensible que la distancia. Con los resultados, un ejercicio de producción fue propuesto para resaltar la importancia del tiempo de ensamble con el método óptimo; el cual mostró que

para un peor caso la producción disminuye el 25% y en el mejor caso 6%; cuando son comparadas con el método óptimo. Finalmente es vista una oportunidad para aplicar diferentes técnicas de optimización y las demás variables que puedan afectar las condiciones del proceso, que ayuden a los analistas de métodos a encontrar el método de ensamble óptimo con el fin de mejorar las proyecciones de producción.

REFERENCIAS

- Anandan, P.D., Hiwarkar, V., Sayed, M.S., Ferreira, P., y Lohse, N., Linear constraint programming for cost-optimized configuration of modular assembly systems. In 49th CIRP Conference on Manufacturing Systems (CIRP-CMS 2016), Stuttgart, Germany, May 25-27th (2016)
- Barnes, R., Motion and Time study: design and measurement of work, U.S.A., John Wiley & Sons (1963)
- Bermúdez-Colina, Y., Aplicaciones de programación lineal, entera y mixta, Ingeniería Industrial, Actualidad y Nuevas Tendencias, 85-104 (2011)
- Coto, E., Algoritmos Básicos de Grafos, Venezuela, Caracas (2003)
- Fraustro, R.J., Implementación de algoritmos para la implementación de trayectorias para brazos manipuladores. Tesis de Maestría. Instituto Politécnico Nacional (2008)
- Jadhav, J.R., Mantha, S.S., y Rane, S.B., Development of framework for sustainable Lean implementation: an ISM approach, Journal of Industrial Engineering International, 10(3), 1-27 (2014)
- Kai, N., Yao-ting, Z., y Yue-peng, M., Shortest Path Analysis Based on Dijkstra's Algorithm in Emergency Response System, Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science, 12(5), 3476-3482 (2014)
- Kanawaty, G., Introducción al Estudio del Trabajo, 4^a Ed., Ginebra, Suiza, OIT (1996)
- Kellegöz, T., y Toklu, B., A priority rule-based constructive heuristic and an improvement method for balancing assembly lines with parallel multi-manned workstations, International Journal of Production Research, 53 (3), 736-756 (2015)
- Kleinberg, J., y Tardos, É., Algorithm design, Boston, Pearson/Addison-Wesley (2006)
- Myers, R.H., Montgomery, D. C., y Anderson-Cook, C. M., Response surface methodology: process and product optimization using designed experiments, John Wiley & Sons (2016)
- Ngai, E. W., Peng, S., Alexander, P., y Moon, K. K., Decision support and intelligent systems in the textile and apparel supply chain: an academic review of research articles, Expert Systems with Applications, 81–91 (2014)
- Ni, J., Tang, W. C., y Xing, Y., Assembly process optimization for reducing the dimensional error of antenna assembly with abundant rivets, Journal of Intelligent Manufacturing, 1-14 (2015)
- Niebel, B., y Freivalds, A., Ingeniería Industrial, Métodos Estándares y Diseño del Trabajo, 11^a Ed., Alfaomega (2004)
- Peña-Cabrera, M., López-Juárez, I., e Ríos-Cabrera, R., Proceso de Aprendizaje con Algoritmo Robusto para la Obtención del POSE de Objetos en Líneas de Ensamble con Robots en Tiempo Real (RT), Información Tecnológica, 17, 61–69 (2006)
- Tinoco, H. A., Ovalle, A.M., Vargas, C. A., y Cardona, M. J., An automated time and hand motion analysis based on planar motion capture extended to a virtual environment., Journal of Industrial Engineering International, 11(3), 391-402 (2015)
- Torrubia, G.S., y Terrazas, V. M., Algoritmo de Dijkstra: un tutorial interactivo, Manual. Universidad Pontificia de Madrid (1995)
- Wong, W.K., Chan, C.K., Kwong, C. K., Mok, P. Y., e Ip, W. H., Optimization of manual fabric-cutting process in apparel manufacture using genetic algorithms, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 27(1-2), 152–158 (2005)