ISSN 2619-1865

Proceedings ICPR Americas 2020

COLECCIÓN CIENCIA Y TECNOLOGÍA

International Conference of Production Research-Americas
(ICPR-Americas). ISSN 2619-1865

Editorial de la Universidad Nacional del Sur
Santiago del Estero 639 – B8000HZK – Bahía Blanca – Argentina
Tel.: 54–0291–4595173 / Fax: 54–0291–4562499
www.ediuns.com.ar | ediuns@uns.edu.ar

Libro Universitario Argentino

CiN REUN
Red de Editoriales de Universidades Nacionales de la Argentina

Diagramación interior y tapa: Fabián Luzi

No se permite la reproducción parcial o total, el alquiler, la transmisión o la transformación de este libro, en cualquier forma o por cualquier medio, sea electrónico o mecánico, mediante fotocopias, digitalización u otros métodos, sin el permiso previo y escrito del editor. Su infracción está penada por las Leyes 11723 y 25446. Queda hecho el depósito que establece la Ley 11723.

Bahía Blanca, Argentina, marzo 2021

© 2021Ediuns.

Estudio de capacidad de producción en sistemas de producción de calzado basado en simulación

Dornes, Florencia[1] – Rossit, Daniel Alejandro[1,2] – López, Nancy B.[1]

[1] Universidad Nacional del Sur, Bahía Blanca, Argentina
[2] INMABB – CONICET, Bahía Blanca, Argentina
dornesflorencia@gmail.com

Abstract. En este trabajo se aborda un caso de estudio de la industria manufacturera del calzado. Particularmente, se analiza el caso de una PyME de calzado de cuero de Argentina. El estudio se focaliza en la variabilidad de rendimiento que implica trabajar con materias primas de origen animal, y su consiguiente impacto en la capacidad de producción. Para ello se modeló el proceso de producción respetando todos los factores que incorporaban incertidumbre al problema. Se generaron simulaciones de eventos discretos para analizar el sistema, y se detectó el cuello de botella. Al analizar las potenciales alternativas para salvar la limitación en la capacidad, se optó por la incorporación de un nuevo trabajador. Los resultados de la propuesta de solución permitieron mostrar que incorporar un trabajador aumentaba la productividad más que proporcionalmente al incremento directo de mano de obra.

Keywords: Plant Simulation, planificación estocástica de la producción, producción de calzado, simulación, cuello de botella.

1 Introducción

La fabricación de calzado es una de las actividades productivas más importantes de Coronel Suárez, localidad de la Provincia de Buenos Aires, Argentina. Consiste en un proceso productivo de elevada complejidad, que involucra diversas máquinas específicas y una gran cantidad de operarios especializados. La diversidad de productos que se pueden obtener conlleva la necesidad de planificación de distintos procedimientos particulares, con operaciones adecuadas para cada modelo. Asimismo, en términos generales, la fabricación involucra las siguientes etapas: recepción de materia prima y cortado, aparado, armado y empaque.

El caso a trabajar es un problema de producción de calzado de seguridad de una empresa argentina, cuyos principales clientes son las fuerzas de seguridad. La problemática primordial radica en la necesidad de trabajar con cuero natural. Este material de origen animal se considera el insumo crítico del proceso puesto que interviene en mayor proporción en la fabricación del producto y, por sus características naturales, los rendimientos de su utilización no son constantes a causa de la variabilidad del tamaño de la pieza de cuero y a la elevada probabilidad de presencia de agujeros en la misma. Por lo tanto, las operaciones iniciales de todo el proceso de fabricación, es decir, el proceso

de cortado y preparado del cuero, tienen un rendimiento variable dependiente de las condiciones del cuero que ingrese. Además, dadas las características mecánicas del cuero, la operación de costura se vuelve realmente crítica. Por lo tanto, la probabilidad de ocurrencia de fallas (ej., rotura de agujas) u operaciones defectuosas (ej., costura deficiente) es significativa. La ocurrencia de dichos eventos (cueros no estándares y fallas operativas) impacta de forma negativa en la planificación de la producción.

En la literatura se encuentran numerosos antecedentes de trabajos que se basan en la simulación de eventos discretos para el estudio de casos similares de manufactura. Entre ellos, Malega et al. [1], Yang et al. [2], Zhang et al. [3] y Wang et al. [4]. Respecto a la industria del calzado, su estudio ha sido abordado por Dang & Pham [5], donde se realiza el diseño de una línea de montaje con 62 tareas, tiempos de operación inciertos y estaciones de trabajo paralelas, con el objetivo de maximizar el desempeño de la línea determinando un ajuste optimizado de los parámetros operativos y una asignación óptima de tareas. Por otra parte, Sadegui et al. [6] realiza la optimización de la línea de producción, haciendo foco en el área de costura, identificada como el cuello de botella del proceso. El objetivo es equilibrar la línea de montaje, minimizando el número de estaciones de trabajo requeridas y suavizando la carga de trabajo en los operadores.

Por otra parte, existen diversos casos donde se aborda la simulación de las fallas de equipos. Ahmadi et al. [7] evalúa las averías de máquina en un entorno estocástico mediante simulación, considerando que tiempo medio entre fallas y la reparación siguen una distribución exponencial. Las mismas consideraciones de distribución son utilizadas por Zandieh & Gholami [8].

En este trabajo se plantea el abordaje de un caso de estudio de una planta de producción de calzado de cuero. El proceso productivo está sujeto a distintas fuentes de incertidumbre que afectan la capacidad de producción, tanto por el rendimiento del cuero como por la probabilidad de rotura de las máquinas. Es por eso que, para aumentar la capacidad de producción, es necesario un abordaje que permita analizar la producción considerando las incertidumbres propias del proceso. Dada la cantidad de operaciones, la complejidad del proceso y la naturaleza propia del mismo (influencia significativa de factores aleatorios), resulta adecuado un enfoque basado en simulación de eventos discretos [9]. Se plantea como alternativa para el aumento de la capacidad de producción la incorporación de un nuevo trabajador. Los resultados avalan la alternativa propuesta mejorando la productividad más que proporcionalmente.

El resto del trabajo se organiza de la siguiente manera. En la Sección 2 se presenta el problema junto con el proceso productivo. En la Sección 3, se analiza la propuesta de mejora y se introduce la herramienta a utilizar. Mientras que en la Sección 4, se define el tipo de experimento a realizar junto con sus parametrizaciones, y se presentan los resultados obtenidos. En la Sección 5, se presentan las conclusiones del trabajo.

2 Descripción del problema

En esta sección, en primer lugar, se describe el proceso de fabricación completo del producto, desde la recepción de la materia prima hasta el acordonado y empaque del mismo. Posteriormente, se identifica y detalla el problema a resolver en este trabajo.

2.1 Descripción del proceso de manufactura

El borcego de seguridad es un producto hecho a base de cuero natural, forrado internamente y reforzado adecuadamente, provisto con suelas con propiedades dieléctricas, resistentes a óleos e hidrocarburos, cementada y pegada con costura de seguridad en Scátola.

El proceso de fabricación del producto en análisis se representa en el diagrama de flujo de la Fig. 1. Si bien el proceso real consiste en múltiples etapas específicas, para los fines del problema que se pretende estudiar en este trabajo se condensó dicha información. Esta condensación consistió en el agrupamiento de operaciones por centro de trabajo, manteniendo el suficiente nivel de detalle como para representar fielmente el problema de capacidad a trabajar. A su vez, esta condensación también respetó la naturaleza estocástica del problema, permitiendo modelar la variabilidad propia de trabajar con materias primas naturales (el rendimiento del cuero es variable) y su procesamiento exigente (rotura de máquinas). Por lo tanto, el problema modelado permite modelar el sistema real de producción validando el modelo.

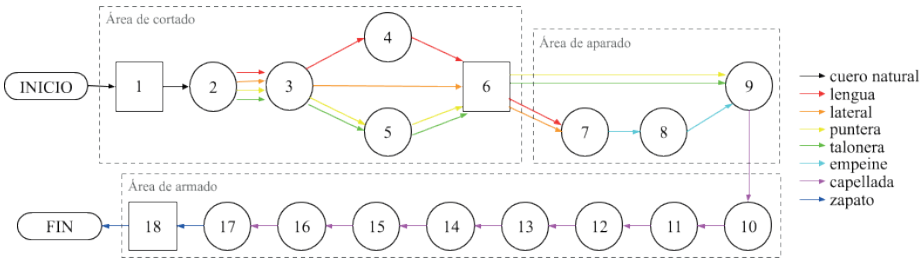

Fig. 1. Diagrama de flujo del proceso productivo de los borcegos de seguridad. Referencias: 1-Recepción de materia prima; 2-Cortado; 3-Rebajado; 4-Bordado de logo; 5-Pegado de refuerzos; 6-Control de calidad intermedio; 7-Cosido de lengua y laterales; 8-Ojalillado; 9-Cosido de la capellada; 10-Costura Strobel; 11-Humectado; 12-Calzado de horma y marcado; 13-Raspado, halogenado y cementado de suela y cortes; 14-Horno; 15-Pegado de suela; 16-Prensado de suela; 17-Costura de seguridad Scátola; 18-Control final, limpieza y empaque.

Su elaboración se inicia con la recepción de materia prima (1), a la cual se procede a realizarle la inspección táctil y visual del cuero, y el control y calibración de espesores. Los materiales se transportan al área de corte, donde se obtienen las diez piezas requeridas para la producción de un par de zapatos: 4 laterales, 2 lenguas, 2 punteras y 2 taloneras. Esto se realiza en un balancín pluma (2), junto con troqueles o sacabocados especiales para cada parte y a la medida de la horma del pie, con cuidado de descartar las secciones del cuero agujereado, arrugado o de espesor variable. Es importante que

se le realice un rebajado de cuero (3) de forma tal que disminuya el espesor en el perímetro de las piezas cortadas para que, al momento de realizar la costura entre piezas, se obtenga un espesor constante y se evite, además, la rotura excesiva de las agujas de las máquinas de coser. Posteriormente, se procede al bordado de la marca de los borcegos (4) en la lengua de éstos, el pegado de refuerzos (5) en las punteras y taloneras, y el control de calidad intermedio (6) de todos los componentes.

En el área de aparado se pegan, doblan y arman las distintas piezas del zapato. Los operarios se encargan de culminar la realización de la capellada realizando el ensamble de las piezas mediante su costura, utilizando máquinas de coser de una (9) y dos agujas (7). Adicionalmente, se realizan los ojales (8) requerido para el acordonado del zapato.

Luego, en el área de armado, se procede a la finalización del zapato. Esto requiere, en primer lugar, del proceso de montado, donde se cose la plantilla de armado mediante la máquina Strobel (10) y se trata el cuero con vapor (11) para ablandarlo en la máquina de humectar cortes. Posteriormente, se realiza el ensuelado por proceso de pegado tradicional, que consiste en el calzado de la horma y marcado de la suela (12), junto con su raspado, se incorpora el adhesivo y se pega (13). Para ello se incrementa la temperatura en un horno (14) y se pega a presión la suela durante 30 segundos (15 y 16). Por último, se desmonta la horma. Adicionalmente se realiza una costura de seguridad en Scátola (17).

Finalmente, el producto se limpia y se realiza el control final del mismo, procediendo a su acordonado y empaque (18).

En la Tabla 1 se muestra la cantidad de trabajadores que actualmente trabajan en la fábrica y el detalle de actividades que realiza cada uno. El número de operación coincide con las operaciones del diagrama de flujo presentado en la Fig. 1.

Tabla 1. Asignación de las operaciones productivas de los trabajadores. Las operaciones se definen a partir de las referencias del diagrama de flujo. Los trabajadores que realizan transporte manual de piezas se indican con una X en la última columna.

Trabajador	Cantidad	Operaciones	Transporte manual de piezas
Worker:1	1	(2)	
Worker:2	1	(3); (4)	X
Worker:3	1	(5); (6)	
Worker:4	1	(7); (8)	
Worker:5	1	(9); (10); (11)	X
Worker:6	1	(12)	
Worker:7	1	(13)	
Worker:8	1	(14); (15)	
Worker:9	1	(16)	
Worker:10	1	(17); (18)	X

2.2 Detalle del problema a resolver

La problemática principal de este proceso es que, al trabajar con materias primas naturales, su acondicionamiento exige un procesamiento intensivo, el cual termina limitando la capacidad de producción real de la planta. Esta limitación se da en el proceso de fabricación por la gran variabilidad del rendimiento de la principal materia prima que es el cuero natural. Al tratarse de un insumo de origen animal, no solo el tamaño de las piezas recibidas resulta variable, sino que también puede presentar agujeros, o algunas secciones quemadas (por el proceso de curtiembre) y con gran frecuencia el espesor es variable. Para minimizar el impacto de estas condiciones en el proceso de producción, la elección del proveedor de materia prima es fundamental, al igual que las habilidades del cortador (operación 2, Fig. 1), quien debe posicionar los troqueles de tal forma que se minimice el descarte de piezas cortadas no aptas para lograr el nivel de calidad deseado del producto final.

Sin embargo, una vez logradas las piezas cortadas, la mayor exigencia se encuentra en el área de aparado (operaciones 7,8 y 9, Fig. 1), donde los operarios deben calibrar las máquinas de coser según el espesor del cuero, ya que, si no se ajusta la máquina al espesor del cuero, entonces la probabilidad de rotura de las agujas crece considerablemente. Es por eso que el desempeño del área de aparado tiene una vinculación directa con el cuero. La criticidad del ajuste de máquina al espesor del cuero es tal que, en una jornada estándar de trabajo, se pueden llegar a romper 10 agujas por día (realizando todos los ajustes necesarios) y, en caso de saltear algún ajuste, la cantidad de roturas de agujas aumenta. Por lo tanto, es un área que demanda mucho tiempo de setup (no es tiempo productivo), e incluso el tiempo de reparación por rotura también es considerable.

Por otro lado, las operaciones de costura allí realizadas inciden directamente en la calidad y estética de los borcegos terminados, por lo que un mal desempeño genera una obtención mayor de zapatos de segunda calidad, lo cual tiene un impacto económico para la empresa. Por lo tanto, se trata de una operación que debe realizarse con el máximo de los recaudos, lo que en términos operativos implica tiempos de operación no reducidos. Es por eso que, para aumentar la capacidad de producción, debe analizarse detenidamente el área de aparado. Para ello se realizaron una serie de simulaciones en condiciones estándares para evaluar, en términos relativos, como se desempeñaba dicha área. En la Fig. 2 se presenta una gráfica que muestra la utilización del tiempo de la jornada laboral por parte de cada trabajador (del inglés, "*worker*"). A simple vista se observa que el único trabajador sin tiempo ocioso es el trabajador 4 (la parte verde implica modo "operación" y la parte gris "esperando"), que resulta ser el trabajador asignado a las operaciones (7) y (8) (Tabla 1). Por lo tanto, se identifica que la limitante de capacidad o el cuello de botella se encuentra en las operaciones (7) y (8) asignadas al trabajador 4.

Fig. 2. Gráfico de barra de las proporciones de los tiempos de las distintas actividades realizadas por cada operario en función del tiempo total de trabajo normalizado, bajo condiciones iniciales.

3 Propuesta de solución

En esta sección se parte del proceso de producción presentado, junto con sus características estocásticas, para analizar una potencial alternativa que permita aumentar la capacidad de producción. Para ello primero se describe la propuesta de solución en términos del proceso productivo y, luego, se proponen los medios para evaluar la solución propuesta.

3.1 Propuesta de solución

El problema de capacidad se evidencia en las operaciones (7) y (8) que son las que realiza el trabajador 4. Esas limitaciones de capacidad se deben a que es una operación muy demandante de mano de obra debido al permanente ajuste que debe realizarse en la máquina para procesar el cuero de espesor variable. Por lo tanto, para aumentar la capacidad de producción del sistema, bastaría con aumentar la capacidad del cuello de botella [10]. Ahora bien, una forma de aumentar la capacidad de producción de esas operaciones sería reduciendo la cantidad de tiempos de ajustes que requiere esa máquina, ya que éstos no son tiempos productivos en el sentido estricto. Sin embargo, la necesidad de los ajustes de máquina se debe a la variabilidad del espesor del cuero, que, tal como se comentó en la sección anterior, es una característica propia de la materia prima que se utiliza para el proceso. Por lo tanto, para reducir el tiempo destinado a los ajustes, sería necesario reducir la variabilidad del espesor del cuero, algo que no es posible.

Por lo tanto, la posibilidad de aumentar la capacidad de esas operaciones radica en aumentar los recursos productivos disponibles en esa operación, ya sea aumentando la cantidad de máquinas, o aumentando la cantidad de operarios. En este trabajo optamos por esta última opción. Lo que se propone como solución para el aumento de la capacidad de producción es la incorporación de un nuevo trabajador asignado a las mismas operaciones que el operario 4 de la Tabla 1.

3.2 Enfoque de implementación de la solución

Para la verificación de la efectividad de la alternativa elegida para el aumento de la capacidad, se utiliza el software Tecnomatix Plant Simulation 15 [11]. Se trata de un

software de simulación del flujo de material en un sistema de eventos discretos. El software permite evaluar procesos complejos y dinámicos brindando el soporte a la toma de decisiones relacionadas con la producción. Para ello, el simulador permite la ejecución de distintos experimentos representando distintas alternativas y configuraciones, sin requerir la experimentación con el ambiente real de producción.

Para el modelado del proceso productivo se tomó en consideración el layout real de la empresa, con tiempos estimados a partir de la producción diaria promedio. Ese Layout se presenta en la Fig. 3., los números asociados a cada una de las estaciones de trabajo condice con los números presentados en las etapas del proceso de la Fig. 1.

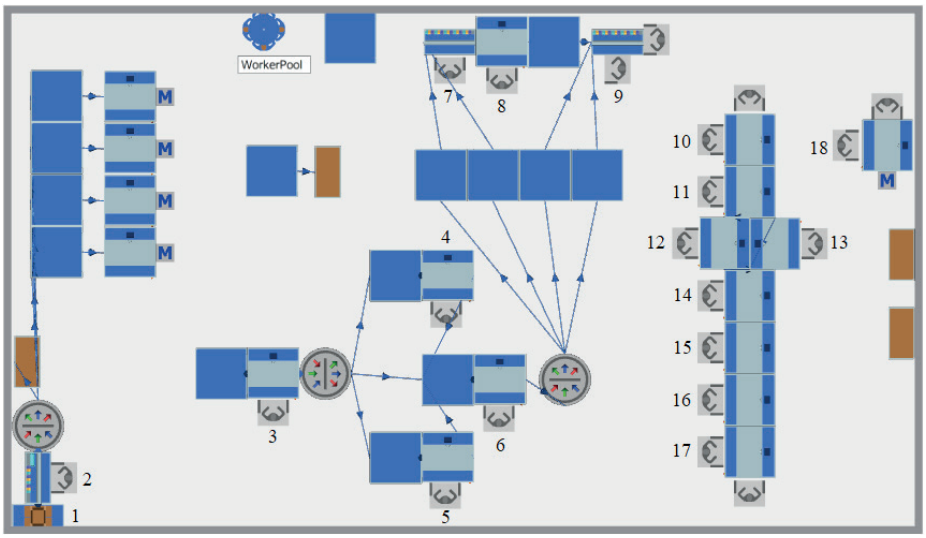

Fig. 3. Vista en planta del modelo 3D del proceso productivo real de calzado, utilizando Plant Simulation. Las referencias corresponden a las operaciones del diagrama de flujo de la Fig.1.

4 Experimentos y resultados

4.1 Diseño experimental

La realización de los experimentos requiere un modelado previo del sistema productivo. Se introdujeron diversos puntos de variabilidad asociados al rendimiento de la materia prima, los tiempos de operación, las fallas operativas por rotura de agujas en el área de aparado y la calidad del producto terminado.

En el caso del rendimiento del cuero natural, se definió considerando un proveedor de materia prima de calidad media-alta, donde las piezas descartadas debido a las deficiencias del material varían de 0 a 4%, con una distribución uniforme.

Respecto a los tiempos operativos, éstos fueron estimados a partir de la información del caso real provista por la PyME, tomando en consideración la producción diaria de

100 zapatos/día. Dado que las actividades son realizadas con la intervención de los trabajadores, los tiempos pueden discrepar debido a factores inherentes del sistema. Dicha variabilidad se modela a partir de una distribución triangular de los tiempos operativos, considerando a los valores mínimos y máximos como una proporción equivalente al 95% y 115% del valor de la moda, respectivamente.

Las fallas por rotura de agujas de las máquinas de coser del área de aparado se determinan a partir de la rotura histórica de agujas en la totalidad de la fábrica, que dependen del material que se procesa. Para el caso particular del cuero, debido a sus características, la rotura es de aproximadamente 10 agujas/día y, se definió para ambas máquinas con un intervalo entre roturas caracterizado por una distribución exponencial negativa. Por su parte, la duración se define a partir de una distribución normal, con un valor esperado de 4 minutos y una desviación estándar de 15 segundos.

Finalmente, se modeló la variabilidad del control de calidad final (operación 18 de la Fig. 1) de manera análoga al rendimiento del cuero. En este caso, los zapatos catalogados como de segunda calidad son de 0% a 2% de la producción total, con una distribución uniforme.

Por último, se establece para la jornada laboral la realización de un único turno, de lunes a viernes, desde las 6:00 hasta las 15:30 hs., con un descanso de 1 hora. Las condiciones hasta aquí detalladas se mantienen durante la realización de los experimentos. Como se describió previamente, la alternativa que se evalúa es incrementar la capacidad del sistema actuando sobre el cuello de botella, lo cual implica la incorporación de un nuevo operario con condiciones idénticas al trabajador 4. Por lo que los experimentos analizados consistieron en:

- Experimento 1: configuración estándar y cantidad de trabajadores estándar
- Experimento 2: configuración estándar y cantidad de trabajadores +1.

4.2 Resultados

Para comparar los dos experimentos se consideró como métrica de comparación la productividad promedio diaria. Se realizaron 50 corridas de cada experimento, con una extensión de 30 días. Los resultados obtenidos se muestran en la Fig. 4 a través de los intervalos de confianza. En la Fig. 4 se observan mejoras sustanciales en la productividad al incorporar un operario más (Experimento 2). El mayor impacto se da en las salidas de borcegos terminados. Bajo las condiciones iniciales (Experimento 1), la producción media es de 2786,73 pares/mes, con un desvío estándar de 286,04 pares. Al implementar la segunda estrategia, incorporando únicamente un nuevo operario en el cuello de botella, la producción es de 3562,47 pares/mes, con un desvío estándar de 340,63 pares. Es decir, la productividad se ve incrementada en un 27,84%. Este incremento porcentual si se lo compara con el incremento porcentual de la fuerza de trabajo (1 trabajador sobre 10 trabajadores, 10%) implica un aumento más que proporcional.

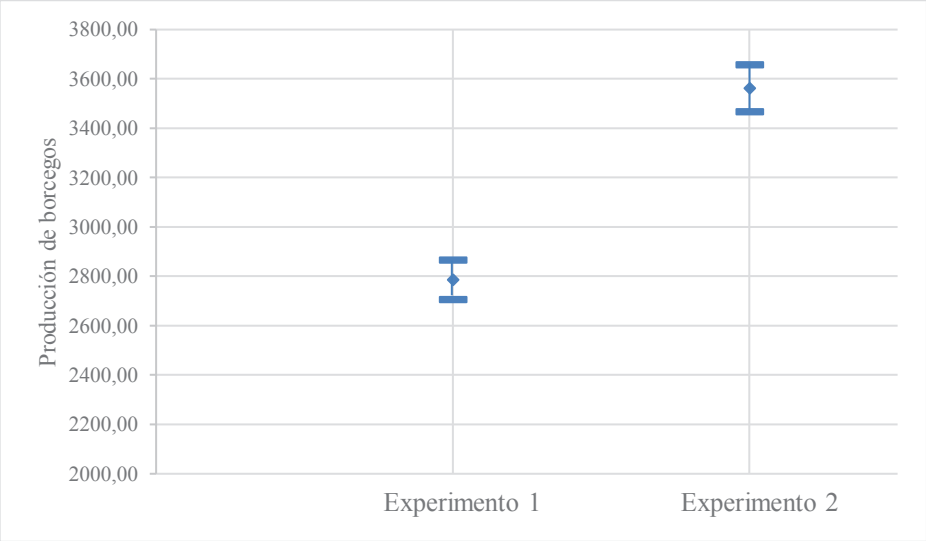

Fig. 4. Intervalo de confianza de la producción de borcegos para el experimento 1, con las conficiones iniciales, y el experimento 2, con la capacidad del cuello de botella incrementada.

Por otra parte, al observar la distribución de la proporción del tiempo trabajado por cada operario (Fig. 5), se observa un incremento general y una disminución en los tiempos de espera, comparado con la Fig. 2. Es de interés consignar que el nuevo trabajador incorporado es denominado como "Worker 5" en la Fig. 5, por lo que los Worker 6 a 11 de la Fig. 5, corresponden a los Worker 5 al 10 de la Fig. 2. Por otro lado, se observa en la Fig. 5, que la carga de trabajo se encuentra más balanceada entre los distintos trabajadores del proceso (las barras verdes tienden a ser más equilibradas que en la Fig. 2).

Fig. 5. Gráfico de barra de las proporciones de los tiempos de las distintas actividades realizadas por cada operario en función del tiempo total de trabajo normalizado, para el Experimento 2. El trabajador adicional se encuentra referenciado como Worker:5, por lo cual los demás trabajadores se ubican desfasados de su designación previa de la Fig. 2.

5 Conclusiones

El trabajo abordó la resolución de la problemática de capacidad de un caso real de una línea de producción de calzado. Para esto, se realizó un modelo de simulación del proceso productivo utilizando el software Plant Simulation, que permitió detectar la principal restricción del sistema, a saber, el área de calzado, en particular el trabajador 4. En consecuencia, se planteó una solución alternativa para incrementar la capacidad del cuello de botella añadiendo un operario extra, y se llevaron a cabo experimentos para evaluar el impacto de la solución propuesta.

Los resultados obtenidos a partir de la comparación de la situación inicial y la alternativa reflejan un impacto positivo significativo en la producción mensual de borcegos de la fábrica. Es decir, la solución propuesta potencia el sistema en conjunto, de forma más que proporcional al incremento de la capacidad.

Referencias

1. Malega, P., Kadarova, J., & Kobulnicky, J. (2017). Improvement of production efficiency of tapered roller bearing by using Plant Simulation. *International Journal of Simulation Modelling*, 16(4), 682-693.
2. Yang, S. L., Xu, Z. G., & Wang, J. Y. (2019). Modelling and production configuration optimization for an assembly shop. *International Journal of Simulation Modelling*, 18(2), 366-377.
3. Zhang, L., Zhou, L., Ren, L., & Laili, Y. (2019). Modeling and simulation in intelligent manufacturing. *Computers in Industry*, 112, 103123.
4. Wang, X., Lu, J., Chen, R., Xu, M., & Xia, L. (2020, June). Research on Design and Planning of Pulsating Aero-engine Assembly Line based on Plant Simulation. In *2020 IEEE 4th Information Technology, Networking, Electronic and Automation Control Conference* (ITNEC) (Vol. 1, pp. 591-595). IEEE.
5. Dang, Q. V., & Pham, K. (2016). Design of a footwear assembly line using simulation-based ALNS. *Procedia CIRP*, 40, 596-601.
6. Sadeghi, P., Rebelo, R. D., & Ferreira, J. S. (2018). Balancing mixed-model assembly systems in the footwear industry with a variable neighbourhood descent method. *Computers & Industrial Engineering*, 121, 161-176.
7. Ahmadi, E., Zandieh, M., Farrokh, M., & Emami, S. M. (2016). A multi objective optimization approach for flexible job shop scheduling problem under random machine breakdown by evolutionary algorithms. *Computers & Operations Research*, 73, 56-66.
8. Zandieh, M., & Gholami, M. (2009). An immune algorithm for scheduling a hybrid flow shop with sequence-dependent setup times and machines with random breakdowns. *International Journal of Production Research*, 47(24), 6999-7027.
9. Banks, J., Carson, J. S., Nelson, B. L., & Nicol, D. M. (2013*). Discrete-event system simulation*: Pearson new international edition. Pearson Higher Ed.
10. Goldratt, E. M. (1990). *Theory of constraints*. Croton-on-Hudson: North River.
11. Bangsow, S. (2015). *Tecnomatix plant simulation*. Berlin: Springer.