

Análisis Comparativo entre diferentes tipos de Sistema de Producción Seru y Línea de Ensamble

Melissa Pájaro Rodríguez y Ciro A. Amaya Guio

Resumen. La implementación del sistema de producción *seru* ha significado una mejora significativa para diversas empresas japonesas de manufactura. Sin embargo, esta implementación no es definitiva, en cambio va evolucionando con el tiempo. Por tal motivo, se identifican diferentes tipos de seru: divisional, rotativo y yatai. El primero es muy similar a la línea de ensamble en cuanto a que los trabajadores se especializan en estaciones de trabajo determinadas, mientras que en los otros dos los trabajadores deben estar totalmente entrenados para completar todas las tareas de la línea de producción. En este estudio se compararon diferentes métricas de producción entre la línea de ensamble y los diferentes tipos de seru. Para ello se desarrolló un modelo de asignación de trabajadores para el seru divisional y la línea de ensamble. Posteriormente se realizaron experimentos en un montaje de laboratorio, donde se determinó la habilidad de los trabajadores y se implementaron diferentes sistemas de producción. Finalmente, se desarrollaron simulaciones de dichos experimentos en un horizonte mayor de tiempo. A partir de los resultados de estas simulaciones se observó un impacto positivo de la implementación de los diferentes tipos de seru en métricas como tiempo de ciclo, *throughput* e inventario en proceso.

Palabras Clave: Sistema de producción Seru, Seru divisional, Seru rotativo, Seru yatai, Tiempo de ciclo, Throughput, WIP, Simulaciones.

1. Introducción

El sistema de producción *seru* (SPS) es un nuevo método de manufactura desarrollado por empresas manufactureras de Japón. Ha sido ampliamente usado en la industria electrónica japonesa como Canon, Sony, Panasonic, Fujitsu, NEC y Hitachi, logrando excelentes resultados reales (Yu & Tang, 2019). Actualmente existen varios sistemas de manufactura similares al SPS, por ejemplo, sistemas de manufactura celular, biónica, entre otros (Wang et al., 2019). No obstante, el sistema de producción *seru* ha adquirido gran importancia dado que se considera como un paradigma para mejorar la productividad, calidad y flexibilidad del proceso simultáneamente (Yin et al., 2017). Entre los beneficios de la implementación de este sistema de producción se encuentran reducir inventario y costos, disminuir el tiempo de espera, aumentar la eficiencia de los trabajadores, mejorar la competitividad en un ambiente dinámico y de alto costo, entre otros (Wang et al., 2019).

La línea de ensamble propuesta por el sistema de producción de Ford fue muy popular hasta 1970 debido a su alta eficiencia; sin embargo, en la década de 1990 surgieron varios cambios en el desarrollo tecnológico, en la economía, en la cultura empresarial y en el mercado de Japón que generaron la necesidad de cumplir con demandas de alta variedad y bajo volumen. Los planes de producción basados en la línea de ensamblaje y en el sistema de producción de Toyota (TPS) son difíciles de aplicar cuando existen cambios rápidos e incertidumbre en las demandas de los clientes. Lo anterior fue justamente lo que comenzó a suceder en la década de 1990, gracias al impacto tecnológico de productos como cámaras, celulares, entre otros. Por esta razón, se hizo necesario un nuevo modo de producción que cumpliera con las demandas del mercado con alta variedad, bajo

volumen, variedades y lotes variables, y ciclos de vida cortos. En comparación con la línea de ensamblaje, la producción *seru* genera ahorros en recursos de mano de obra, espacio, inventario, y tiempo de espera (Yu & Tang, 2019).

De acuerdo con Yu et al, la producción *seru* tiene las siguientes características: *Kanketsu* (integridad del proceso), es decir que todas las tareas requeridas se realizan por completo dentro del *seru*; autonomía, ya que en cada *seru* los trabajadores son responsables por la mayoría de tareas, es decir que ellos pueden mejorar sus habilidades por ellos mismos; mejoramiento continuo, tanto de las habilidades de los trabajadores como del rendimiento de cada *seru*; producción paralela, cuando en el sistema hay varias unidades de *seru* y cada una realiza la producción; y finalmente reconfiguración (alta flexibilidad), puesto que el SPS se puede reconfigurar rápidamente de acuerdo con las demandas del cliente. Esta última característica se basa en que los *serus* deben estar compuestos de equipos sencillos y móviles, y trabajadores con diversas habilidades (Yu et al., 2018).

Seru significa célula en japonés y fue llamado así para diferenciarlo del sistema de producción celular tradicional CM (*cellular manufacturing*) (Yin et al., 2017). Como se mencionó previamente, un *seru* es una unidad de ensamblaje que incluye equipo sencillo y uno o varios trabajadores que realizan la mayoría de procesos de la producción (Yu & Tang, 2019). Los trabajadores entonces pueden ser *multi-skilled* (pueden completar varias tareas) o *fully skilled* (pueden completar todas las tareas). De hecho, el SPS es un sistema de manufactura centrado en los trabajadores con un alto grado de *Jiritsu*, lo cual significa autonomía, autogestión, aprendizaje y auto evolución (Yin et al., 2018). Diversos reportes de casos de implementación del SPS han concluido que este se puede adaptar a demandas de alta variedad y volúmenes bajos y variables, y además se puede reorganizar flexiblemente siguiendo demandas dinámicas, y puede mejorar el sentido de responsabilidad de los trabajadores. Sin embargo, el SPS no puede mejorar la productividad en todos los casos. Por ejemplo, en producciones en masa, la eficiencia del SPS es peor que la de la línea de ensamble (Yu & Tang, 2019).

Entonces la pregunta que se han hecho varios investigadores es cuándo es conveniente utilizar un sistema de producción *seru*. Johnson estudió la conversión de la línea de ensamble a un SPS en la producción de productos de hojas de metal, y concluyó que cuando el plazo de entrega es corto y los productos son personalizados por los clientes el sistema *seru* debe ser empleado (Johnson, 2005). Por su parte, Kaku et al. llegó a la conclusión que las empresas deben implementar el SPS en un ambiente de alta variedad y bajo volumen después de estudiar un modelo multiobjetivo de minimización del *makespan* y de la hora labor (Kaku et al., 2009). Asimismo, Yu et al. dedujo que un SPS puro debe ser aplicado en casos de alta variedad y bajo volumen a partir de un análisis de un diseño factorial de experimentos computacionales (Yu et al., 2012). Por otra parte, Yin et al. subrayó que la producción *seru* debe ser propuesta en respuesta a un ambiente con un mercado dinámico y altos costos (Yin et al., 2017).

Es importante también considerar que existen tres tipos diferentes de SPS; *seru* divisional, *seru* rotativo y *yatai*. El primero consiste en una línea de ensamble corta con trabajadores parcialmente entrenados. Las tareas dentro de un *seru* divisional están divididas en diferentes secciones o estaciones. Cada sección está a cargo de uno o más trabajadores, y cada vez que se completa una sección, se pasa a la siguiente. Los trabajadores usualmente se encuentran entrenados, pero no están totalmente capacitados para realizar todas las tareas. Por otro lado, en el *seru* rotativo hay varios trabajadores y cada uno de ellos ensambla todo el producto desde el inicio hasta el final, por lo que son totalmente capacitados (Yu & Tang, 2019). Finalmente, en el *yatai* solamente un trabajador realiza todas las actividades operativas y directivas por sí solo (Yu et al., 2012). En este tipo de *seru*, el trabajador no tiene la necesidad de moverse entre estaciones de trabajo por herramientas ya que todo es accesible para él (C. Liu et al., 2013), y adicionalmente el trabajador se encuentra totalmente entrenado para cumplir con todas las tareas necesarias (C. Liu et al., 2012).

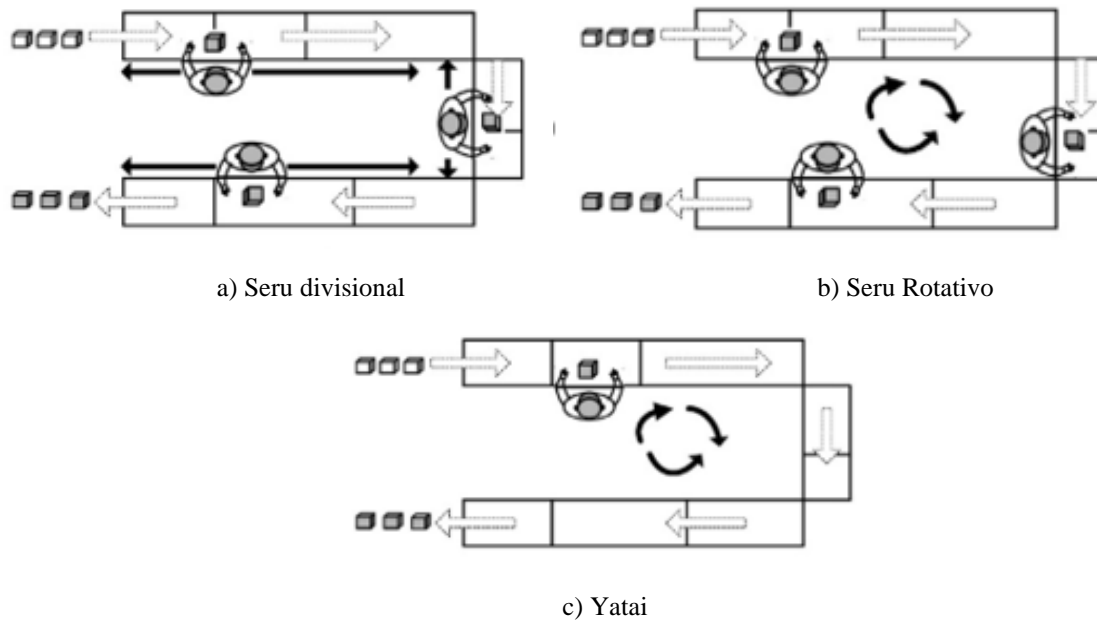


Fig. 1. Tipos de seru. Adaptado de (Gai et al., 2020)

Un sistema *seru* puro contiene uno o más *serus* sin ninguna línea de ensamble. Pero también es posible tener una combinación entre *serus* y líneas de ensamble, y se denomina un sistema híbrido de línea de ensamble y seru (Yu & Tang, 2019).

El proceso de implementación del sistema de producción seru se puede resumir en los siguientes pasos (Yin et al., 2017):

1. Se presenta una demanda con muchas variaciones e ineficiencias en la línea de ensamble, por lo que se hace necesario una estrategia enfocada en el nivel de respuesta.
2. Las líneas de ensamble son dismanteladas y reemplazadas por sistemas seru divisionales ubicando recursos humanos, realizando entrenamientos cruzados y desarrollando autonomía en los trabajadores.
3. La maquinaria costosa y específica es reemplazada por equipos de propósitos generales que pueden ser duplicados y redistribuidos como sea necesario en los seru.
4. A medida que progresa el entrenamiento cruzado, los seru divisionales evolucionan a seru rotativos y *yatais*.
5. Con el tiempo el sistema seru va madurando y la configuración de las celdas se desarrolla de tal forma que se responde apropiadamente a los requerimientos de la demanda configurándose y dismantelándose cuando es necesario.

Teniendo en cuenta que hay diferentes tipos de SPS, el problema que se quiere analizar es una comparación de los diferentes tipos de *seru* y de la línea de ensamble considerando diferentes métricas de producción. Aboelfotoh llevó a cabo un estudio en el que comparó el desempeño de la línea de ensamble con un sistema de *serus* configurados como *yatais* y desarrolló una herramienta de selección entre *seru yatai* y línea de ensamble dependiendo del nivel de habilidades de los trabajadores (Aboelfotoh et al., 2018). Por su parte, Zwierzynski et al, implementaron simulaciones computacionales de líneas de ensamble y seru, donde compararon la producción, el tiempo promedio en el sistema, la utilización de los trabajadores, el tiempo promedio en espera y el inventario, mostrando mejoras en todos los indicadores al transformar una línea de ensamble tradicional a un sistema seru (Zwierzyński & Ahmad, 2018). Considerando estos precedentes, se pretende desarrollar modelos matemáticos de asignación de trabajadores para el seru divisional y para la línea de ensamble,

y con estos resultados llevar a cabo simulaciones computacionales con base en datos reales recolectados a nivel laboratorio. Dichas simulaciones permitirán comparar el desempeño de los diferentes tipos de seru y la línea de ensamble.

2. Metodología

2.1 Construcción de modelos para seru divisional y línea de ensamble

En el caso del seru divisional y de la línea de ensamble es necesario desarrollar un modelo de asignación de trabajadores para encontrar la distribución más adecuada de estos dentro de la línea de producción (Wu et al., 2018). Como se mencionó anteriormente, en este tipo de seru, cada trabajador tiene asignado unas tareas determinadas, y este conjunto de tareas constituye la estación de trabajo.

Supuestos:

- Todos los trabajadores son capaces de realizar todas las tareas.
- El nivel de habilidad de los trabajadores para las tareas se encuentra dado por una variable aleatoria (tiempo de procesamiento de cada tarea).
- Se deben utilizar todos los trabajadores disponibles.
- Cada estación incluye diferentes tareas que deben cumplir con la secuencia requerida para armar el producto final.
- Cada estación solo puede tener un solo trabajador por limitación de espacio, por lo que no se comparte ninguna tarea entre trabajadores.
- El tiempo de desplazamiento y de montaje no son tenidos en cuenta.
- En la línea de manufactura solamente se realizan las tareas para el ensamble de un producto en específico.

Dado que el tiempo de procesamiento en cada tarea por cada trabajador es una variable aleatoria estocástica se decidió desarrollar este modelo de una forma determinística por medio de varios escenarios, los cuales están ponderados equitativamente en la función objetivo.

Nomenclatura:

Índices

i índice de tareas ($i = 1, 2, \dots, n$)

j índice de estaciones ($j = 1, 2, \dots, m$)

k índice de trabajadores ($k = 1, 2, \dots, m$)

r índice de escenarios ($r = 1, 2, \dots, s$)

Parámetros

t_{rik} = tiempo de procesamiento en la tarea i por el trabajador k para el escenario r

β = proporción de balanceo

(u, v) = precedencias inmediatas (u es un precedente inmediato de v)

Variables de decisión

T = Tiempo total de procesamiento promedio entre los escenarios

$$X_{ijk} = \begin{cases} 1 & \text{si la tarea } i \text{ es asignada a la estación } j \text{ con el trabajador } k, \\ 0 & \text{d.l.c} \end{cases}$$

$$y_{kj} = \begin{cases} 1 & \text{si el trabajador } k \text{ es asignado a la estación } j \\ 0 & \text{d.l.c} \end{cases}$$

Modelo de asignación de trabajadores para el seru divisional y línea de ensamble:

Función objetivo

$$z = \min(T)$$

s.a

$$\frac{(\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^m \sum_{r=1}^s t_{rik} X_{ijk})}{s} \leq T \quad (1)$$

$$\sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^m X_{ijk} = 1 \quad \forall i \quad (2)$$

$$y_{kj} \leq \sum_{i=1}^n X_{ijk} \quad \forall j, \forall k \quad (3)$$

$$\sum_{i=1}^n X_{ijk} \leq y_{kj} n \quad \forall j, \forall k \quad (4)$$

$$\sum_{j=1}^m y_{kj} = 1 \quad \forall k \quad (5)$$

$$\sum_{k=1}^m y_{kj} = 1 \quad \forall j \quad (6)$$

$$\sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^m X_{ujkj} \leq \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^m X_{vjkj} \quad \forall (u, v) \in W \quad (7)$$

$$\left(\left| \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m t_{rik} X_{ijk} - \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m t_{ri(k+1)} X_{ij(k+1)} \right| \right) \leq \beta \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m t_{rik} X_{ijk}$$

$$\forall r, \quad k = 1, 2, \dots, m-1 \quad (8)$$

La función objetivo consiste en minimizar el tiempo promedio de procesamiento total para los diferentes escenarios analizados. En la restricción (1) se encuentra la expresión para calcular este tiempo promedio. La restricción (2) consiste en que cada tarea debe ser asignada a una estación con un trabajador, mientras que en la restricción (3) se establece que cada estación con trabajador debe tener una tarea asignada. En la ecuación (4) se restringe el máximo número de tareas asignadas a una estación y a un trabajador. Por su parte las restricciones (5) y (6) permiten que solo haya una estación

para cada trabajador, y un trabajador para cada estación respectivamente. La ecuación (7) establece el orden de las tareas que se debe respetar al asignarlas en las estaciones. El conjunto W está compuesto por las precedencias inmediatas. Finalmente, la restricción (8) permite que la línea de producción se encuentre balanceada entre trabajadores al comparar el tiempo total de procesamiento de un trabajador con el siguiente. La diferencia máxima permitida entre estos tiempos de procesamiento es una proporción β del tiempo de procesamiento del primer trabajador.

El modelo de asignación de trabajadores se resolvió para dos niveles de cantidad de escenarios s (10 y 50 escenarios) y para valores de β entre 0.2 y 0.4 con el fin de determinar el efecto del valor de estos parámetros y evaluar las soluciones propuestas para cada caso. Para esto, cada una de las combinaciones entre número de escenarios y parámetro β se resolvieron en el modelo de asignación con 100 réplicas.

2.2 Experimentación

Se llevó a cabo una serie de experimentos en el laboratorio de ingeniería industrial en la Universidad de los Andes donde se simuló un sistema de manufactura con bandas transportadoras como se observa en la Fig. 2. En todos los experimentos, el producto final fue el carro de *legos* de la Fig 3. El proceso de armado de este artículo parte de piezas individuales y se dividió en 7 tareas, las cuales se ubicaron a lo largo de la línea de manufactura.



Fig. 2. Montaje de los experimentos



Fig. 3. Producto final de los experimentos

La secuencia de las tareas se encuentra en la Fig 4, donde se identifican las precedencias necesarias para cada una de las tareas realizadas en la línea de producción.

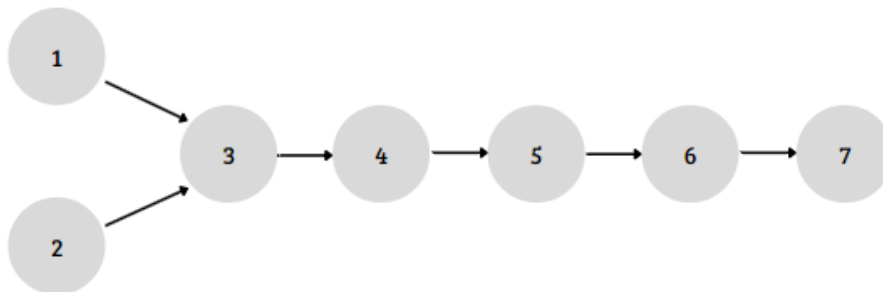


Fig 4. Secuencia de las tareas

Los experimentos se llevaron a cabo con dos trabajadores. En un primer lugar se determinó el nivel de habilidad de cada uno de los trabajadores midiendo el tiempo que se demoraban en cada tarea. En este punto se evidenció el efecto de la curva de aprendizaje/olvido en el nivel de habilidad de cada trabajador. Una vez el tiempo de procesamiento comenzó a estabilizarse, lo cual se observó a partir de 10 productos armados por completo, se midió el tiempo de procesamiento de cada tarea con 30 réplicas para ajustar una distribución adecuada del tiempo en minutos para cada trabajador. Asimismo, se midió el tiempo de desplazamiento entre cada tarea, el cual influye en el tiempo de ciclo de producción, con el fin de ajustar una distribución estadística apropiada y emplearla en la simulación.

Finalmente, se realizaron mediciones del tiempo de ciclo de la línea de producción en diferentes configuraciones, teniendo en cuenta los tipos de sistemas de producción que se pretenden comparar. Para cada uno de los experimentos se llevaron a cabo dos réplicas con el fin de confirmar los datos obtenidos.

2.3 Simulaciones computacionales

Una vez ajustados los tiempos de procesamiento y desplazamiento, y con las configuraciones obtenidas de los resultados del modelo del seru divisional, se construyeron los modelos de simulación para cada uno de los tipos de producción. Estos modelos incluyeron tanto el tiempo de procesamiento en cada tarea como el tiempo de desplazamiento entre tareas. Se utilizó la librería Simmer en R para la implementación y análisis de las simulaciones, las cuales tienen como objetivo evaluar las diferencias para los diferentes tipos de configuraciones estudiadas. Cabe resaltar que una vez fueron contruidos los modelos en el software, estos fueron verificados y validados con los experimentos desarrollados en el laboratorio.

Las configuraciones que se implementaron en las simulaciones son las siguientes:

- Línea de ensamble
- Seru divisional *PUSH*
- Seru divisional *CONWIP*
- Seru rotativo
- Seru yatai

Cada una de estas simulaciones se desarrollaron para 4 horas de trabajo continuo con los dos trabajadores, y adicionalmente se implementaron 100 réplicas de cada caso. La generación de llegadas al sistema no se estableció como una variable aleatoria, en cambio una parte llega al sistema cada vez que el trabajador encargado de la tarea 1 se encuentre disponible en dicha tarea. Lo anterior se implementó de esa forma con el fin de realizar una validación más apropiada del modelo de simulación. En el caso del sistema pull (seru divisional CONWIP) se configuró la activación de una llegada al sistema cada vez que una parte sale de la última tarea, es decir la tarea 7.

3. Resultados

3.1 Curva de aprendizaje y de olvido

El desempeño de un trabajador no es constante en el tiempo ya que, si trabaja en la misma operación continuamente durante una cantidad de tiempo determinada, su nivel de habilidades mejora. Asimismo, su nivel de habilidades disminuye cuando no desarrolla la operación por un tiempo (Süer et al., 2019).

En los experimentos desarrollados se logró evidenciar la evolución del tiempo de procesamiento a medida que cada trabajador armaba una mayor cantidad de partes (Fig. 5 y Fig. 6).

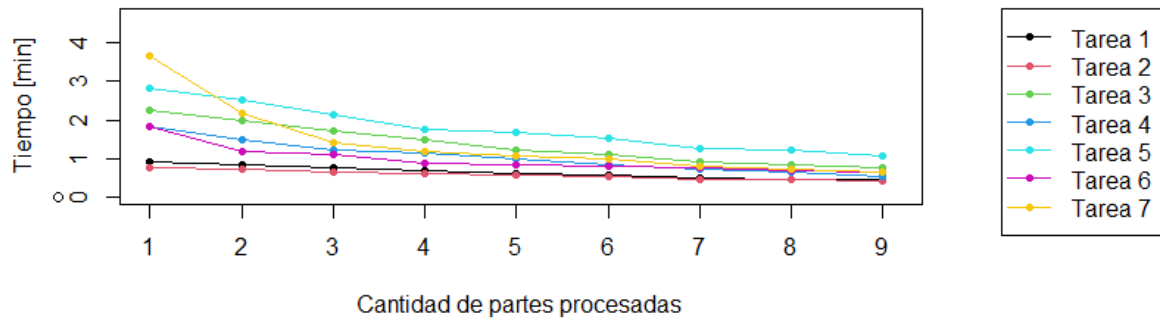


Fig. 5. Tiempo de procesamiento del trabajador 1

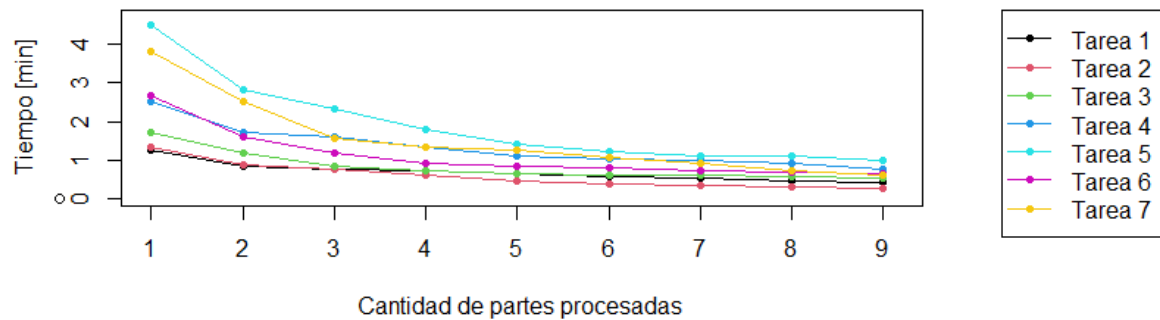


Fig. 6. Tiempo de procesamiento del trabajador 2

Para las partes procesadas posterior a este análisis, se realizó el supuesto que los trabajadores no continuaron con esta tendencia de aprendizaje y su tiempo de procesamiento se estabilizó alrededor de una variable aleatoria. Entonces, una vez estabilizado el tiempo de procesamiento de ambos trabajadores se realizaron los experimentos para medir el nivel de habilidad de cada trabajador y ajustarlo a una distribución estadística, al igual que con el tiempo de desplazamiento entre tareas.

3.2 Ajuste del tiempo de procesamiento

En la Fig. 7 se encuentran los diagramas de cajas de los tiempos de procesamiento para cada trabajador y para cada tarea. Con el objetivo de alimentar esta información como parámetro a los modelos desarrollados se ajustó cada uno de estos tiempos a una distribución continua. En la Fig 8 se encuentra, como ejemplo, el ajuste realizado para el tiempo de la tarea 6 para el trabajador 2, el cual coincide adecuadamente con una distribución uniforme. La distribución más apropiada se escogió a partir de una gráfica de sesgo y curtosis, y con una comparación del parámetro máxima verosimilitud para varias distribuciones. Al igual que el ejemplo mostrado, el tiempo de procesamiento de las demás tareas para ambos trabajadores también se ajustaron a una distribución uniforme continua. Es importante aclarar que los datos se ajustaron a una distribución uniforme continua para cada tarea y para cada trabajador, es decir que en total se calcularon 14 distribuciones uniformes continuas a partir de los datos tomados en el laboratorio.

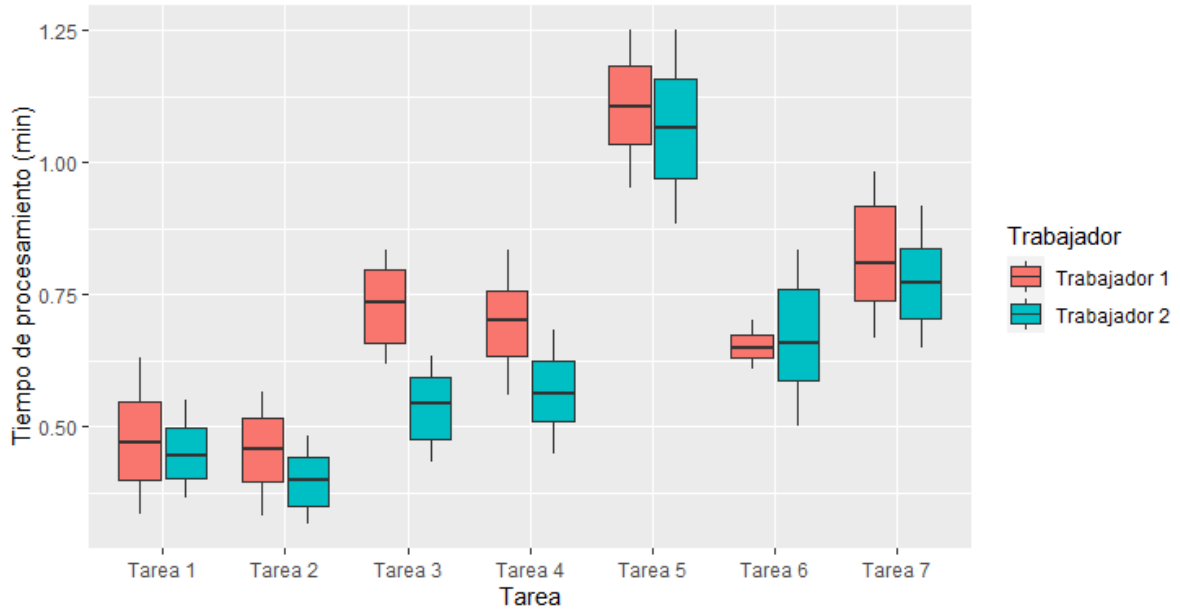


Fig. 7. Diagrama de cajas del tiempo de procesamiento medido en los experimentos

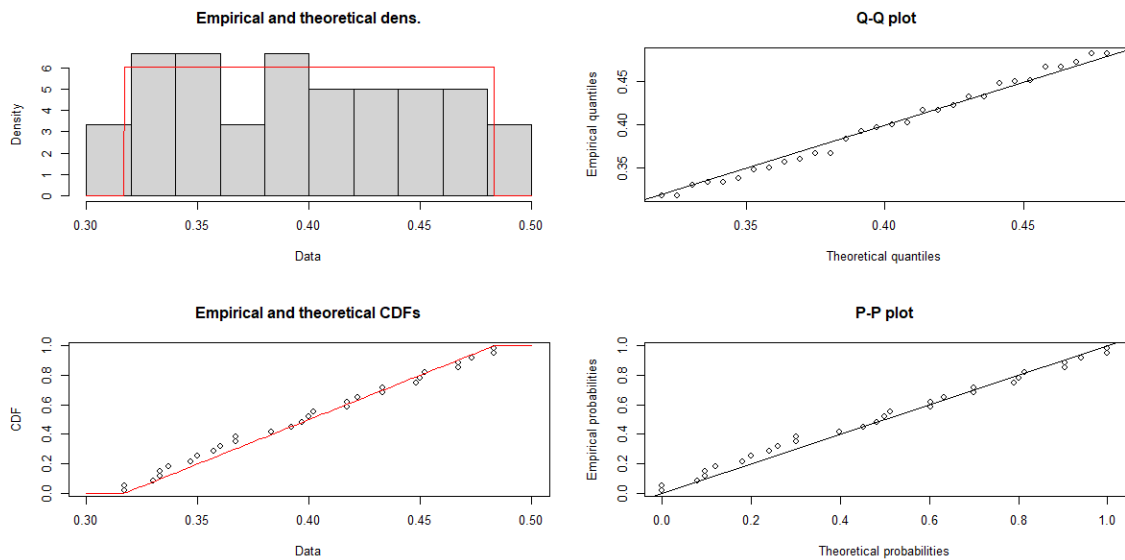


Fig. 8. Ajuste del tiempo de procesamiento de la tarea 6 para el trabajador 2 con una distribución uniforme

3.3 Ajuste del tiempo de desplazamiento

De la misma forma como se ajustó el tiempo de procesamiento de las tareas, también se ajustó el tiempo de desplazamiento entre las tareas a una distribución estadística. Para este caso el resultado más adecuado fue una distribución lognormal como se puede observar en la Fig 9 y Fig 10.

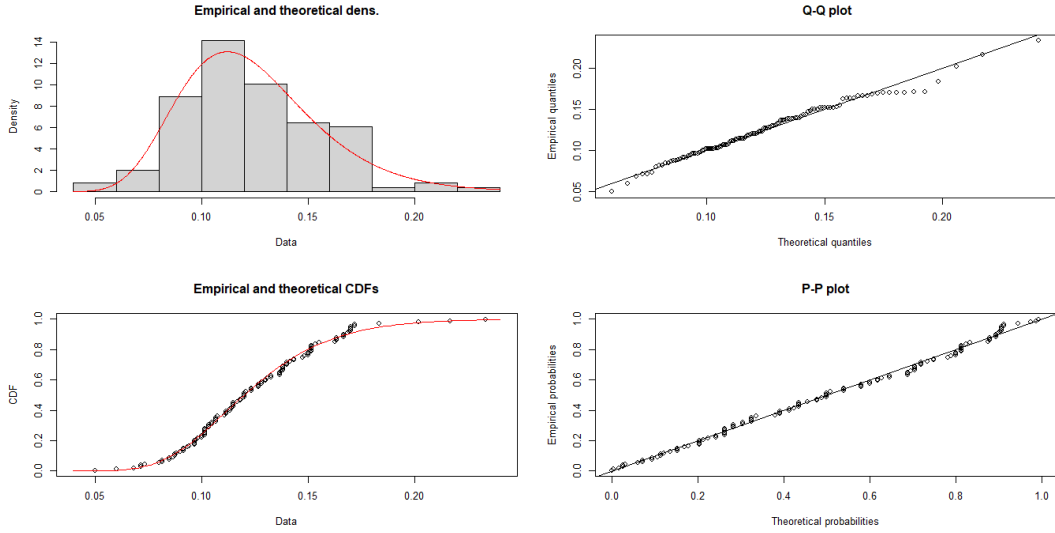


Fig. 9. Ajuste del tiempo de procesamiento del tiempo de desplazamiento entre tareas a una distribución lognormal

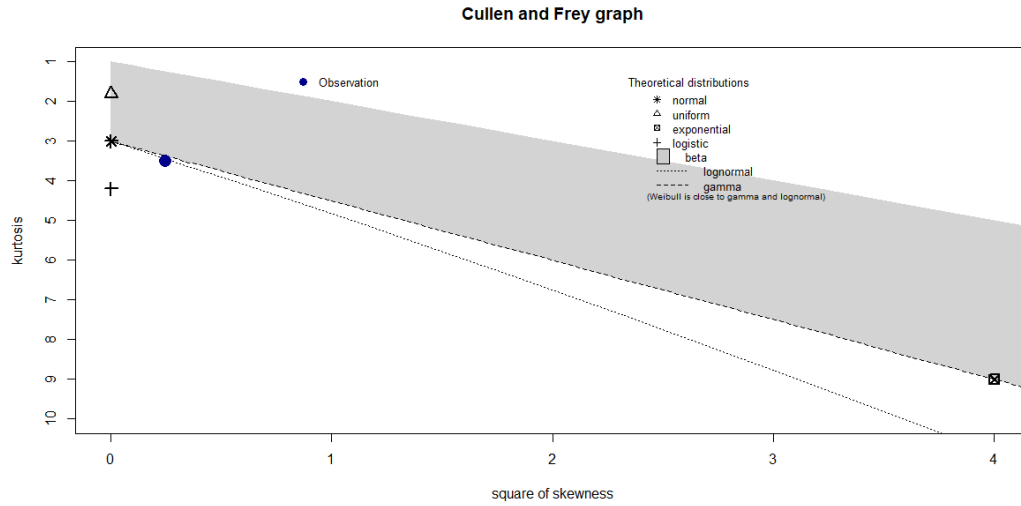


Fig. 10. Gráfica de sesgo-curtosis para el tiempo de desplazamiento entre tareas

3.4 Resultados del modelo de asignación para el seru divisional y línea de ensamble

Las distribuciones estadísticas ajustadas para el tiempo de procesamiento de los trabajadores en cada tarea fueron alimentadas al modelo de asignación para el seru divisional y línea de ensamble. En la Tabla 1. se muestran los resultados obtenidos al resolver el problema con ayuda del software Gurobi, como la participación de cada una de las soluciones encontradas. estas se encuentran las graficadas en la Fig. 11, y además una solución no factible. Como se mencionó previamente se desarrolló un análisis de sensibilidad para dos valores de cantidad de escenarios, y un rango de valores para el parámetro β , en cual define la proporción de balanceo de la línea.

Tabla 1. Resultados del modelo de asignación de trabajadores con 100 réplicas

| Parámetro β | Escenarios | | | | | |
|-------------------|------------|------------|-------------|------------|------------|-------------|
| | 10 | | | 50 | | |
| | Solución 1 | Solución 2 | No factible | Solución 1 | Solución 2 | No factible |
| 0.2 | 64% | 0% | 36% | 8% | 0% | 92% |
| 0.25 | 94% | 0% | 6% | 82% | 0% | 18% |
| 0.3 | 99% | 0% | 1% | 98% | 0% | 2% |
| 0.35 | 100% | 0% | 0% | 100% | 0% | 0% |
| 0.4 | 94% | 6% | 0% | 100% | 0% | 0% |

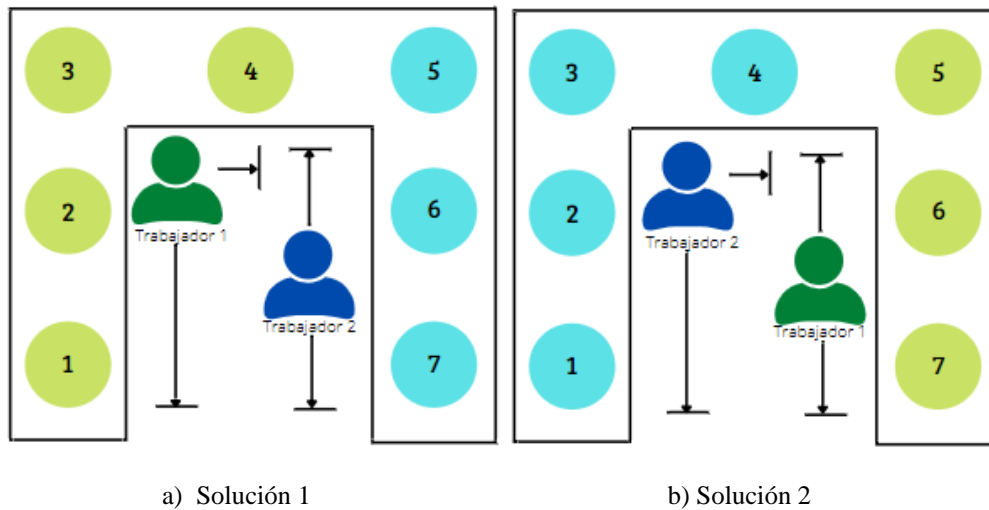


Fig. 11. Configuraciones encontradas a partir del modelo de asignación

Se observa que al aumentar la cantidad de escenarios evaluados el problema se vuelve más condicionado y adicionalmente, si el parámetro β también disminuye, el modelo tiende a ser inviable. Esto sucede dado que, si el parámetro β es muy bajo, el problema tiene una mayor restricción de balanceo. Por otro lado, es evidente que la solución 1 de la Fig. 11 es la que predomina en todos los casos evaluados en la Tabla 1. Esta solución, a diferencia de la solución 2, es la que permite un mejor balanceo del sistema. Debido a lo anterior fue la que se decidió emplear para todos los experimentos y simulaciones posteriores tanto para la línea de ensamble como para el seru divisional.

3.5 Resultados de las simulaciones

3.5.1 Línea de ensamble

El sistema de línea de ensamble que se llevó a cabo en los experimentos para posteriormente implementarlos en un modelo de simulación se encuentra en la Fig. 12. No se llevó a cabo la implementación de una línea de ensamble tradicional (un trabajador por tarea) por restricciones de aforo dentro del laboratorio donde se desarrollaron los experimentos. En este sentido, se utilizaron los resultados del modelo de asignación desarrollado y un sistema push en el cual, el trabajador 1 regresa a la tarea 1 a comenzar una nueva pieza, inmediatamente después de finalizar la tarea 4.

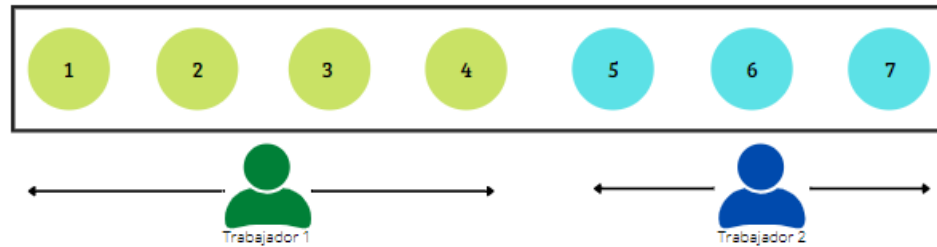


Fig. 12. Línea de ensamblaje implementada

En la Fig. 13. se encuentra el trabajo en proceso promedio (WIP) de los trabajadores a lo largo del tiempo de la simulación, es decir el número de unidades que tiene cada uno en uso en promedio. Las diferentes líneas representan las réplicas de la simulación. Se observa que el trabajador 1 permanece solo con una unidad en uso sin ninguna fila dado que, como se mencionó anteriormente, la llegada de partes está dada por la disponibilidad del trabajador 1 en la tarea 1. Por otro lado, el trabajador 2 sí se llega a encontrar con una fila de partes y por ende con más de una unidad en su sistema como recurso. Esta fila se debe principalmente a que la tarea 5 corresponde al cuello de botella de la línea. Adicionalmente, aunque la asignación de trabajadores se realizó procurando un buen balanceo de la línea, existe una diferencia entre el tiempo total de procesamiento del trabajador 1 con respecto al trabajador 2, siendo el tiempo del segundo mayor.

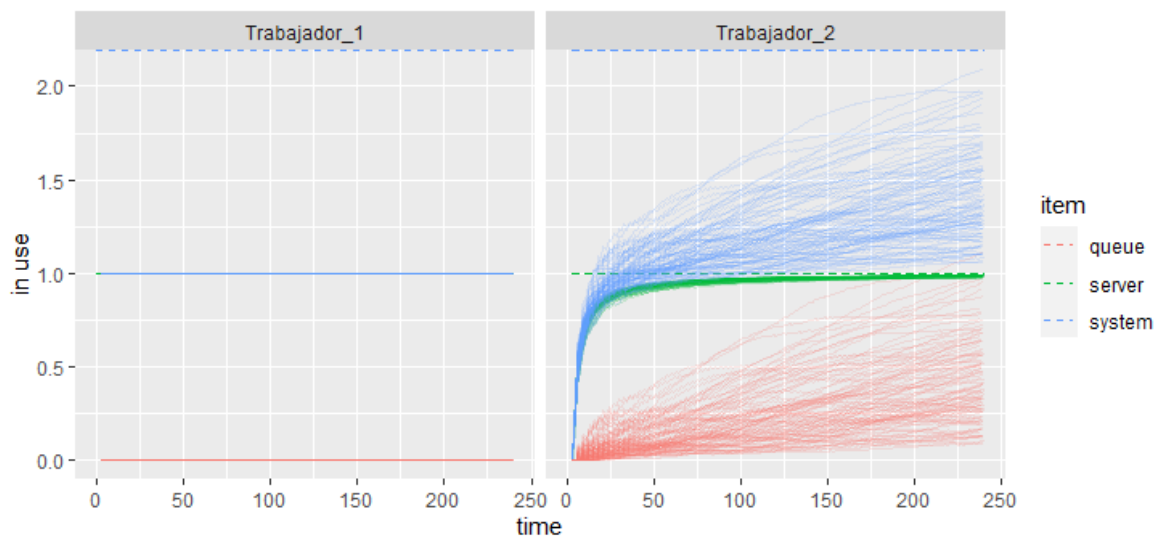


Fig. 13. WIP de cada trabajador en la simulación de la línea de ensamblaje

3.5.2 Seru divisional – Sistema Push

En el seru divisional se utilizó la misma asignación de la línea de ensamblaje, pero la configuración de la línea se realizó en forma de U. Por este motivo, el tiempo de desplazamiento entre tareas se vio disminuido con respecto a la anterior configuración. Esta disminución en el tiempo de desplazamiento ocasionó que el inventario en proceso aumentara y, en consecuencia, que también aumentara el número de partes promedio en la fila del trabajador 2. Lo anterior también se puede ver reflejado en el porcentaje promedio del tiempo de actividad (tiempo de actividad entre tiempo total de la simulación), el cual pasó a ser de 80.97% en la línea de ensamblaje a 68.54% en el seru divisional como sistema push.

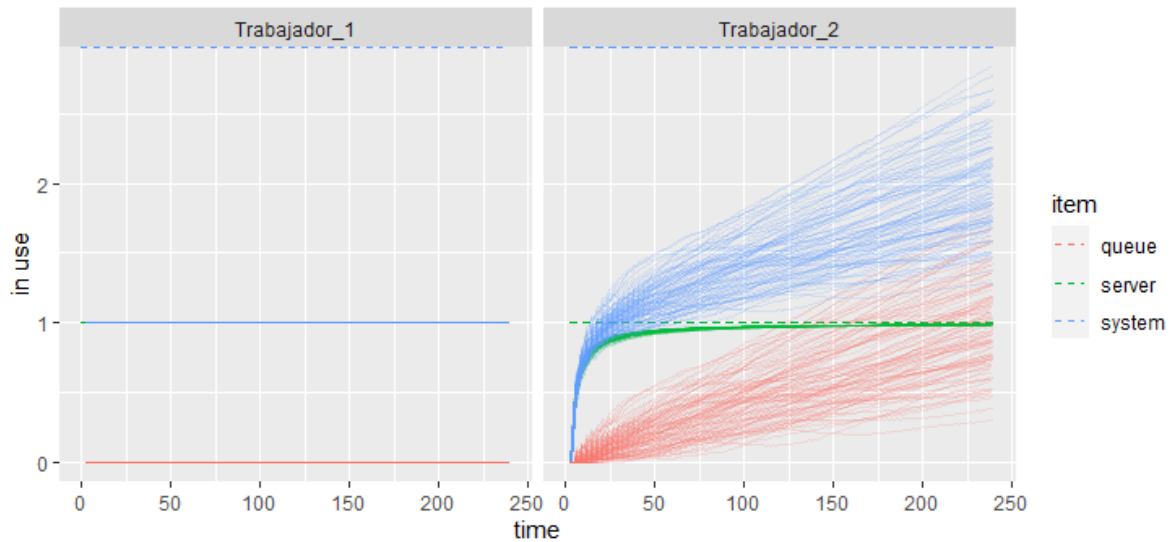


Fig. 14. WIP de cada trabajador en la simulación del seru divisional – sistema push

3.5.3 Seru divisional – Sistema Pull (CONWIP)

A diferencia del seru divisional en configuración push, este seru divisional se configuró como un sistema CONWIP en el cual solo se comienza a trabajar en la tarea 1, si la pieza dentro del sistema salió de la última tarea, es decir la tarea 7. Por lo tanto, no se genera la fila en el sistema entre las tareas 4 y 5 y en promedio los trabajadores tienen menos de una unidad en uso a lo largo de la duración de la simulación. Esto se traduce a que la utilización de los trabajadores (el porcentaje de tiempo que se utiliza a cada uno de los trabajadores en comparación con el tiempo total de simulación), disminuye para esta configuración, siendo 48% y 52% para el trabajador 1 y 2 respectivamente para esta configuración, y ~100% para las demás configuraciones.

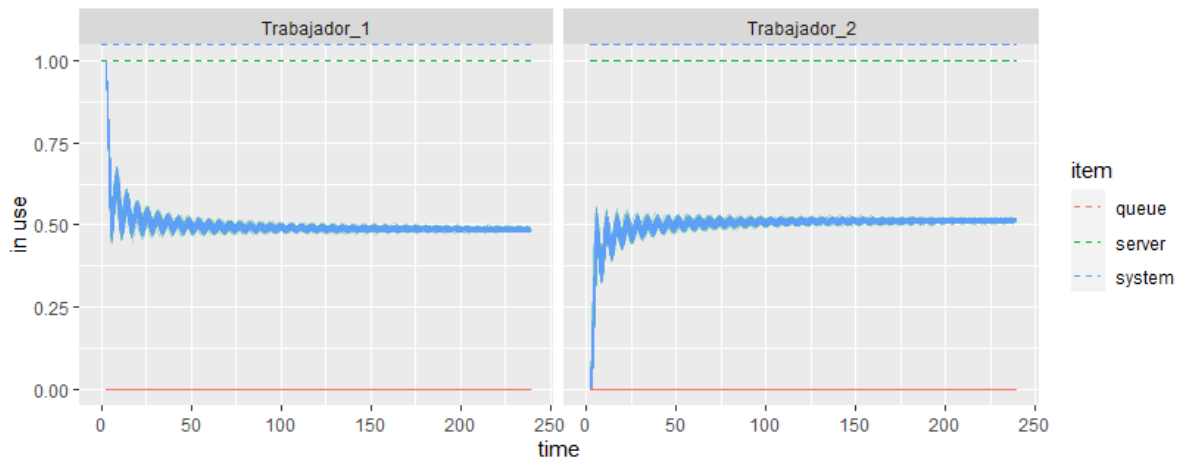


Fig. 15. WIP de cada trabajador en la simulación del seru divisional – sistema pull

3.5.4 Seru rotativo

En un seru rotativo, los trabajadores totalmente entrenados completan todas las tareas de la línea de manufactura uno por uno en un orden fijo. Después de terminar un producto, el trabajador regresa a la primera estación para comenzar con otra pieza. Se le llama también “rabbit-chasing Seru”, ya

que se asemeja a un juego donde se persiguen conejos (C. G. Liu et al., 2010). En la Fig. 16. se encuentra la configuración desarrollada en las simulaciones, donde el trabajador 2 está adelante del trabajador 1. Las simulaciones del seru rotativo presentan menos variación que las de la línea de ensamble y las del seru divisional como se observa en la Fig. 17, y ambos trabajadores tienen ~ 1 unidad en uso en promedio durante toda la simulación. El tiempo de espera por parte del trabajador 1 corresponde a solo el 3% del tiempo total.

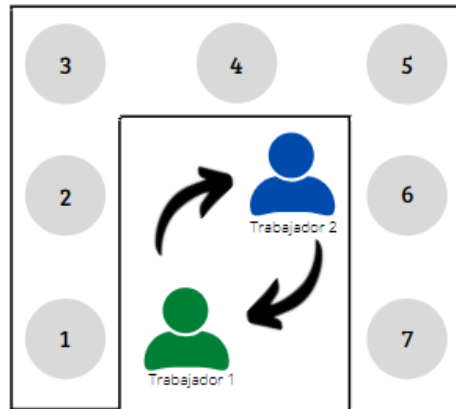


Fig. 16. Seru rotativo implementado

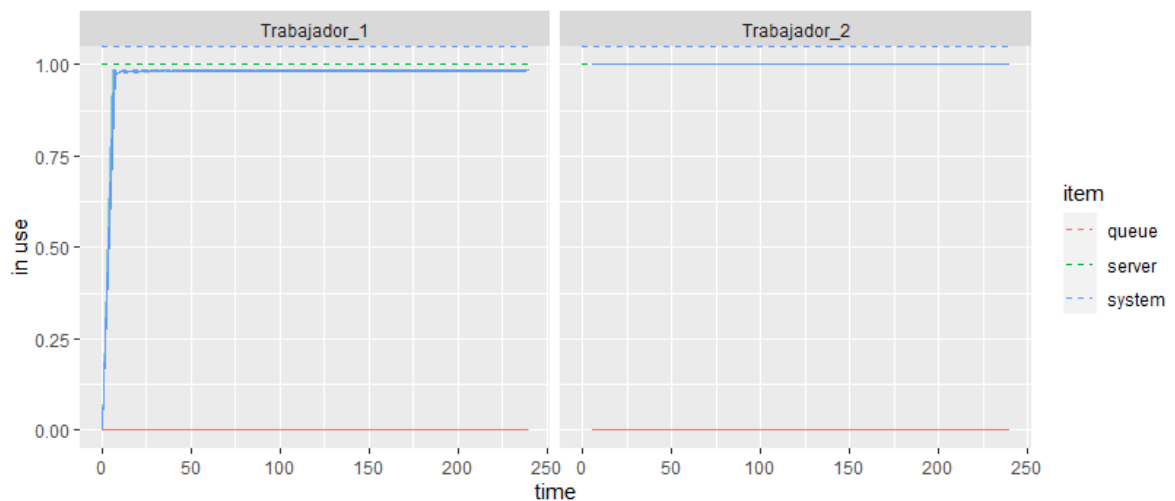


Fig. 17. WIP de cada trabajador en la simulación del seru rotativo

3.5.5 Yatai

Como se mencionó previamente, un yatai es una unidad seru con un solo trabajador, el cual realiza todas las actividades operativas y directivas necesarias para la producción. En la Fig. 18 se encuentra la configuración que se implementó para este tipo de seru en las simulaciones. Durante los experimentos se notó que este tipo de seru requiere una mayor cantidad de espacio por trabajador, dado que para cada trabajador se necesita realizar el montaje de toda la línea de manufactura. No obstante, al convertir una línea de ensamble en un seru yatai normalmente también se modifican los equipos para que el sistema de producción sea más flexible, por lo que no siempre el espacio ocupado va a aumentar.

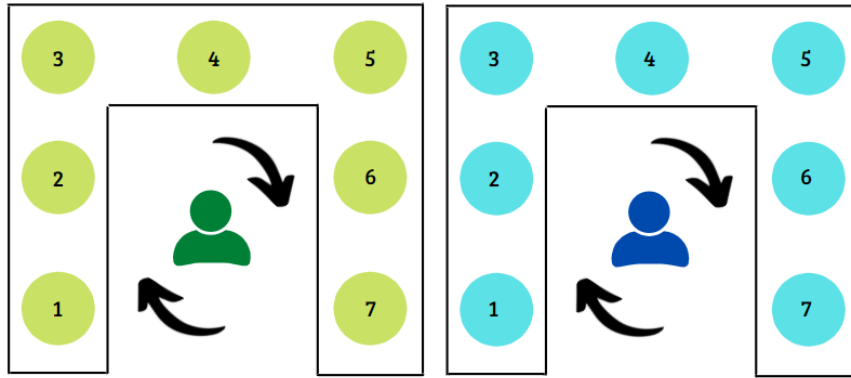


Fig. 18. Seru yatai implementado

Dado que el sistema de seru *yatai* comprende dos líneas de manufactura y cada trabajador se encarga una, la utilización de los trabajadores es del 100% y constantemente a lo largo de la simulación se encuentran con una unidad en uso. Al igual que con el seru rotativo, no hay tiempo de espera ya que no se generan cuellos de botella.

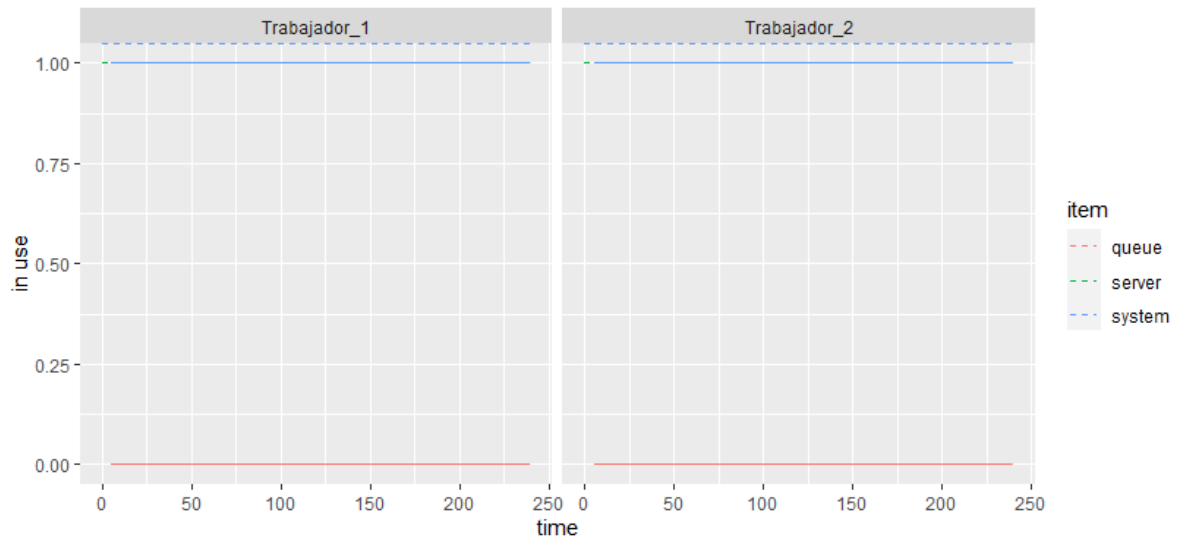


Fig. 19. WIP de cada trabajador en la simulación del seru yatai

3.6 Comparación de las simulaciones

3.6.1 Tiempo de ciclo

En la Fig. 20. se encuentra un diagrama de cajas que asocia el tiempo de ciclo promedio para cada una de las configuraciones simuladas. Es evidente que la línea de ensamble y el seru divisional en sistema push presentan una mayor variabilidad que los demás tipos de seru. Adicionalmente, el tiempo de ciclo de estas dos configuraciones tiende a tener un mayor valor que las demás. Lo anterior tiene sentido ya que se encuentra relacionado con el cuello de botella que se genera en ambas configuraciones. De hecho, a la distribución del tiempo de ciclo seru divisional en sistema push tiende a tener mayores valores que la línea de ensamble, ya que se forma un mayor cuello de botella como se observó en la simulación previamente. En cuanto al seru divisional en sistema pull es el que tiene

una tendencia a un menor tiempo de ciclo dado que es aquel que optimiza el tiempo de procesamiento por medio del modelo de asignación y no presenta cuellos de botella.

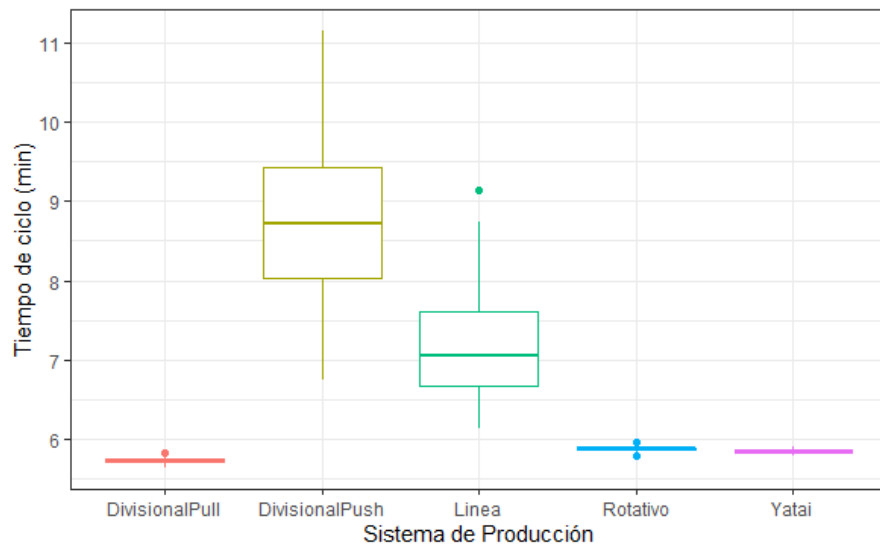


Fig. 20. Comparación del tiempo de ciclo

3.6.2 Throughput

En la Fig. 21. se compara la tasa de producción (*throughput*) en unidades por hora para los diferentes casos analizados. Evidentemente el seru divisional en sistema pull presenta una tasa muy baja dado que el objetivo de este sistema consiste en reducir costos de producción e inventarios al limitar la misma tasa de producción respondiendo a las necesidades del cliente. Las demás configuraciones presentan un valor del *throughput* muy similar, pero sobresale el seru *yatai*, el cual tiende a tener la mayor tasa. Cabe resaltar que la diferencia en magnitud de la tasa de producción no es muy elevada pero estos resultados son producto de experimentos a nivel laboratorio. En un ambiente industrial donde las tareas toman una mayor cantidad de tiempo, la diferencia puede ser más notoria.

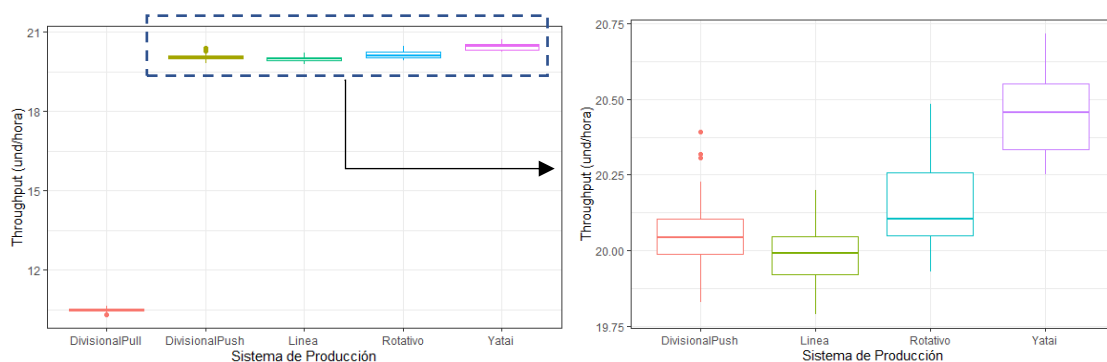


Fig. 21. Comparación del throughput

3.6.3 WIP

Finalmente, se calculó el inventario en proceso por medio de la Ley de Little relacionando el tiempo de ciclo y el *throughput*. Debido a la alta variabilidad y altos valores del tiempo de ciclo en el seru divisional con sistema push y en la línea de ensamble, hay un inventario en proceso alto y variable

en estas dos configuraciones, lo cual está relacionado nuevamente con el cuello de botella. Por su parte, el seru yatai mantiene un inventario en proceso igual a 2, ya que hay dos yatais en el sistema; y el seru rotativo un inventario en proceso ~ 2 dado que los dos trabajadores se encargan de dos piezas simultáneamente. Claramente el *WIP* del seru divisional en sistema pull es igual a 1 ya que toda la línea se encarga de solo una pieza hasta terminarla.

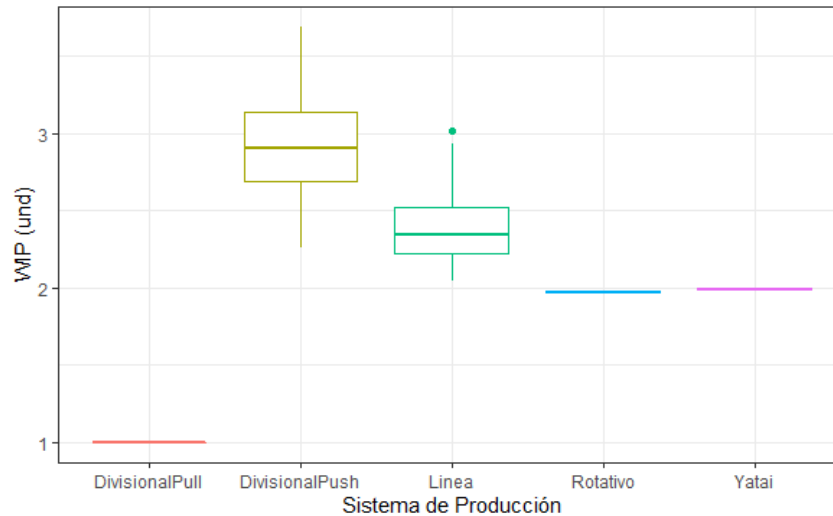


Fig. 22. Comparación del WIP

4. Análisis de los resultados

Al analizar conjuntamente las métricas evaluadas para las diferentes configuraciones que se estudiaron, es evidente que cada configuración presenta sus ventajas y desventajas. La línea de ensamble y el seru divisional en sistema push se encuentran restringidos por los cuellos de botella, lo cual produce un aumento en los tiempos de espera e inventario en proceso. Es importante tener en cuenta que inclusive si se realiza el cambio de línea de ensamble a un seru divisional en sistema push, los costos de inventario en proceso pueden aumentar. No obstante, al hacer una prueba no-pareada de la diferencia entre medias del *throughput* del seru divisional en sistema push y de la línea de ensamble, se encuentra que con un nivel de confianza del 95%, la tasa de producción en el seru es mayor.

El problema de tanto la línea de ensamble como el seru divisional también se encuentra relacionado con su poca capacidad de respuesta. Cuando los trabajadores son asignados a tareas específicas y el tiempo de ciclo está sujeto a los cuellos de botella, los trabajadores menos eficientes pueden bloquear el paso de los trabajadores más eficientes, lo cual ocasiona pérdidas significativas en el tiempo de actividad (Gai et al., 2020). Adicionalmente, estos dos sistemas son poco flexibles y en un ambiente con alto dinamismo no son apropiados. Sin embargo, se ha encontrado que la línea de ensamble es adecuada cuando no existen entrenamientos cruzados, es decir cuando el nivel de habilidad entre los trabajadores difiere significativamente (Aboelfotoh et al., 2018).

En cuanto a las otras configuraciones de SPS, como se mencionó anteriormente, requieren trabajadores completamente entrenados. Lo anterior puede significar grandes costos, pero en un ambiente dinámico trae muchos beneficios. Los resultados de las simulaciones muestran que el tiempo de ciclo promedio de los serus rotativo y yatai es 18% menor que el de la línea de ensamble. Asimismo, una prueba no-pareada de la diferencia de medias permitió concluir que con un nivel de confianza de 95%, la media del *throughput* del seru rotativo es mayor que la del seru divisional. El

seru *yatai* cuenta con la mayor tasa del throughput del estudio dado que se aprovechan los dos recursos disponibles (los trabajadores) al máximo en esta configuración. Esto se debe a que la utilización es del 100% y el SPS permite que los cuellos de botella sean nulos. Finalmente, es importante mencionar que el inventario en proceso se mantiene bajo un mayor control con los serus rotativo y *yatai* sin tener que sacrificar el rendimiento en las otras métricas como el tiempo de ciclo y el *throughput*.

En resumen, los SPS avanzados (seru rotativo y *yatai*) tienen un impacto muy beneficioso en las líneas de manufactura. Además de la reducción en tiempos de ciclo y de inventario en proceso, y del aumento de la producción, hay otros beneficios como la alta flexibilidad y motivación por parte de los trabajadores. No cabe duda de que la instalación y reconfiguración de los serus es más rápida y fácil que con la línea de ensamble, lo cual dificulta los cambios que se deseen hacer sobre la línea. Asimismo, dado que los trabajadores en los SPS ya no realizan tareas repetitivamente y pueden explorar sus habilidades, tienen más oportunidades para tomar decisiones y mejorar su desempeño (C. G. Liu et al., 2010).

5. Conclusiones y trabajos futuros

El sistema de producción seru está propuesto como un modo de producción para superar la baja flexibilidad de la línea de ensamble (Yu & Tang, 2019). En empresas japonesas de la industria electrónica como Canon y Sony ha tenido buenos resultados como lo son un incremento de la productividad, reducción de la longitud de las líneas de ensamble, reducción del espacio requerido, reducción de los costos, mejora de la calidad del producto, entre otros (Zwierzyński & Ahmad, 2018). En este estudio se pretendió comparar el desempeño de diferentes tipos de seru con simulaciones computacionales construidas a partir de experimentos a nivel laboratorio. De los experimentos se encontró que es muy importante tener en cuenta la curva de aprendizaje y olvido, dado que es una fuente de variabilidad en el sistema. También es importante considerar el tiempo de desplazamiento entre tareas o estaciones de trabajo, puesto que el tiempo de flujo depende de esta variable.

Se construyó un modelo de asignación de trabajadores buscando minimizar el tiempo de procesamiento de los trabajadores y restringiendo el problema a una proporción máxima de balanceo. Fue posible implementar este modelo teniendo como parámetros de tiempo de procesamiento en las tareas a variables aleatorias, y se realizó un análisis de sensibilidad dependiendo del número de escenarios evaluados y de la proporción de balanceo.

Partiendo de la solución del modelo de asignación y de los datos recolectados en los experimentos se logró modelar cada una de las configuraciones en un software de simulación. Considerando los resultados de estas simulaciones se puede concluir que el *throughput* de la producción mejora con cada paso de la conversión entre línea de ensamble y seru. En otras palabras, el *throughput* del seru *yatai* es más alto que el del seru rotativo, y el de este es mayor que el del seru divisional. El tiempo de ciclo también disminuye para el seru rotativo y el seru *yatai* en comparación con la línea de ensamble, puesto que los cuellos de botella se disminuyen/eliminan. Por último, el inventario en proceso de los serus rotativo y *yatai* son menores y tienen una menor variabilidad que los de la línea de ensamble.

Para trabajos futuros se propone generalizar el problema planteado y generar un modelo que prediga la conveniencia de cada tipo de seru y su impacto en diferentes métricas de producción. Para ello sería conveniente evaluar el desempeño de la producción en diferentes niveles de variables del problema como número de trabajadores, número de tareas, nivel de habilidad de los trabajadores, entre otros. Adicionalmente, como extensión del estudio sería interesante desarrollar una

comparación adicional con un sistema de seru híbrido, es decir el que incluye una unidad seru y una línea de ensamble.

Referencias

- Aboelfotoh, A., Süer, G. A., & Abdullah, M. (2018). Selection of assembly systems; assembly lines vs. Seru systems. *Procedia Computer Science*, 140, 351–358.
<https://doi.org/10.1016/j.procs.2018.10.304>
- Gai, Y., Yin, Y., Tang, J., & Liu, S. (2020). Minimizing makespan of a production batch within concurrent systems: Seru production perspective. *Journal of Management Science and Engineering*, xxxx. <https://doi.org/10.1016/j.jmse.2020.10.002>
- Johnson, D. J. (2005). Converting assembly lines to assembly cells at Sheet Metal Products: Insights on performance improvements. *International Journal of Production Research*, 43(7), 1483–1509. <https://doi.org/10.1080/00207540412331299594>
- Kaku, I., Gong, J., Tang, J., & Yin, Y. (2009). Modeling and numerical analysis of line-cell conversion problems. *International Journal of Production Research*, 47(8), 2055–2078.
<https://doi.org/10.1080/00207540802275889>
- Liu, C. G., Lian, J., Yin, Y., & Li, W. (2010). Seru Seisan- an innovation of the production management mode in Japan. *Asian Journal of Technology Innovation*, 18(2), 89–113.
<https://doi.org/10.1080/19761597.2010.9668694>
- Liu, C., Li, W., Lian, J., & Yin, Y. (2012). Reconfiguration of assembly systems: From conveyor assembly line to serus. *Journal of Manufacturing Systems*, 31(3), 312–325.
<https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2012.02.003>
- Liu, C., Yang, N., Li, W., Lian, J., Evans, S., & Yin, Y. (2013). Training and assignment of multi-skilled workers for implementing seru production systems. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 69(5–8), 937–959. <https://doi.org/10.1007/s00170-013-5027-5>
- Süer, G., Ulutas, B., Kaku, I., & Yin, Y. (2019). Considering product life cycle stages and worker skill level in SERU production systems. *Procedia Manufacturing*, 39(2019), 1097–1103.
<https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.01.361>
- Wang, J., Ye, N., & Peng, Y. (2019). Case studies on design for SERU manufacturing. *Procedia Manufacturing*, 39(2019), 1090–1096. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.01.362>
- Wu, L., Chan, F. T. S., Niu, B., & Li, L. (2018). Cross-trained worker assignment and comparative analysis on throughput of divisional and rotating seru. *Industrial Management and Data Systems*, 118(5), 1114–1136. <https://doi.org/10.1108/IMDS-07-2017-0303>
- Yin, Y., Stecke, K. E., & Li, D. (2018). The evolution of production systems from Industry 2.0 through Industry 4.0. *International Journal of Production Research*, 56(1–2), 848–861.
<https://doi.org/10.1080/00207543.2017.1403664>
- Yin, Y., Stecke, K. E., Swink, M., & Kaku, I. (2017). Lessons from seru production on manufacturing competitively in a high cost environment. *Journal of Operations Management*, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.jom.2017.01.003>
- Yu, Y., Gong, J., Tang, J., Yin, Y., & Kaku, I. (2012). How to carry out assembly line-cell conversion? A discussion based on factor analysis of system performance improvements. *International Journal of Production Research*, 50(18), 5259–5280.
<https://doi.org/10.1080/00207543.2012.693642>

- Yu, Y., & Tang, J. (2019). Review of seru production. *Frontiers of Engineering Management*, 6(2), 183–192.
- Yu, Y., Wang, J., Ma, K., & Sun, W. (2018). Seru system balancing: Definition, formulation, and exact solution. *Computers and Industrial Engineering*, 122(March), 318–325.
<https://doi.org/10.1016/j.cie.2018.05.048>
- Zwierzyński, P., & Ahmad, H. (2018). *Seru production as an alternative to a traditional assembly line*. 10(3). <https://doi.org/10.2478/emj-2018-0017>