

Optimización del flujo y utilización de recursos en procesos de limpieza y desinfección de contenedores reutilizables mediante DMAIC en sistemas logístico-farmacéuticos

Optimization of flow and resource utilization in cleaning and disinfection processes of reusable containers using DMAIC in pharmaceutical logistics systems

Ortiz, Gisela¹; Medero, Pamela¹; Olivares, Luis¹; García, María¹; Rondón, Jairo^{2*}

¹ Industrial Engineering Department, Universidad Politécnica de Puerto Rico, San Juan, PR 00918, USA

² Biomedical & Chemical Engineering Departments, Universidad Politécnica de Puerto Rico, San Juan, PR 00918, USA
[*jrondon@upr.edu](mailto:jrondon@upr.edu)

Resumen

Este estudio presenta la optimización de un proceso de limpieza y desinfección de contenedores reutilizables en un entorno logístico del sector farmacéutico mediante la metodología Lean Six Sigma bajo el enfoque DMAIC (Definir, Medir, Analizar, Mejorar y Controlar). El análisis de datos operacionales evidenció que, aunque el sistema cumplía con la demanda promedio de 3.868 unidades diarias, presentaba una alta variabilidad ($\sigma = 732$), lo que afectaba la estabilidad del flujo y la eficiencia global. Se integraron análisis de productividad, tiempos de ciclo y capacidad del proceso, determinándose que la principal restricción no era la capacidad instalada, sino el diseño del flujo y la asignación de recursos. Asimismo, se observó que el incremento en la dotación de personal no necesariamente mejora el desempeño, y que la variabilidad en los tiempos de procesamiento constituye un factor crítico en la inestabilidad del sistema. La implementación de mejoras basadas en balance de línea, la estandarización de tareas y la eliminación de actividades sin valor agregado, permitieron reducir el tiempo de ciclo en aproximadamente un 30 % y mejorar la estabilidad del proceso. Adicionalmente, se logró una reducción significativa de los costos operativos. Los resultados demuestran que la eficiencia de los sistemas logísticos depende principalmente de la gestión del flujo y de la variabilidad.

Palabras clave: Lean Six Sigma, variabilidad del proceso, capacidad del proceso, optimización de flujo

Abstract

This study presents the optimization of a cleaning and disinfection process for reusable containers in a pharmaceutical logistics environment using the Lean Six Sigma methodology under the DMAIC framework (Define, Measure, Analyze, Improve, and Control). The analysis of operational data revealed that, although the system met the average demand of 3,868 units per day, it exhibited high variability ($\sigma = 732$), affecting flow stability and overall efficiency. Productivity analysis, cycle time evaluation, and process capability assessment were integrated, showing that the main constraint was not the installed capacity, but rather the flow design and resource allocation. It was also observed that increasing workforce size does not necessarily improve performance, and that variability in processing times constitutes a critical factor in system instability. The implementation of improvements based on line balancing, task standardization, and elimination of non-value-added activities allowed a reduction of approximately 30% in cycle time and improved process stability. Additionally, a significant reduction in operational costs was achieved. The results demonstrate that efficiency in logistics systems primarily depends on flow management and variability reduction.

Keywords: Lean Six Sigma, Process variability, Process capability, Flow optimization

1 Introducción

La gestión del flujo en sistemas productivos y logísti-

cos constituye un elemento central de la ingeniería industrial, particularmente en entornos en los que la continuidad del suministro depende de la sincronización entre procesos

interdependientes. En estos sistemas, la interacción entre la variabilidad operativa, la capacidad instalada y la asignación de recursos determina la estabilidad del desempeño y la confiabilidad del servicio (Montgomery, 2020; Ivanov, 2021).

En las operaciones de limpieza y desinfección de contenedores reutilizables en las cadenas logísticas del sector farmacéutico, la variabilidad desempeña un papel crítico. Las diferencias en los tiempos de ciclo, la mezcla de productos y la dependencia de actividades manuales pueden generar fluctuaciones significativas en el flujo del sistema. Cuando este flujo no está adecuadamente balanceado, pequeñas variaciones se amplifican a lo largo del proceso, provocando acumulaciones, tiempos de espera y pérdida de eficiencia global, un fenómeno ampliamente descrito en la literatura Lean (Womack y col., 1997; Tortorella y col., 2018).

Diversos estudios han demostrado que la mejora del desempeño en sistemas productivos no depende exclusivamente del incremento de recursos, sino también de la reducción de la variabilidad y de la estandarización del flujo (McDermott y col., 2022; Chiarini y col., 2018).

De manera complementaria, la literatura ha documentado la aplicación de enfoques de calidad, Lean, Six Sigma y Lean Six Sigma en diversos sectores en los que la eficiencia, la reducción de desperdicios y la confiabilidad del proceso son elementos críticos. En la industria de alimentos, Costa y col. (2018) identificaron que estas metodologías se han utilizado para mejorar los procesos productivos, reducir la variabilidad y fortalecer el desempeño operativo.

De forma similar, Henrique y Godinho Filho (2020) reportaron aplicaciones empíricas de Lean y Six Sigma en el sector salud, destacando su contribución a la mejora del flujo de trabajo, la calidad del servicio y la eficiencia de los procesos. Asimismo, desde una perspectiva más amplia de la gestión de la calidad, Psomas y Antony (2017) evidenciaron que los principios de la calidad total también se han aplicado en instituciones de educación superior, lo que refuerza la adaptabilidad de estos enfoques a distintos contextos organizacionales.

En este contexto, la metodología Lean Six Sigma, y particularmente el enfoque DMAIC, proporciona un marco estructurado basado en datos que permite identificar causas raíz, reducir desperdicios y mejorar la capacidad efectiva del sistema (Sreedharan y col., 2020; Tampubolon y col., 2021).

A pesar de ello, en muchos entornos operativos persiste una brecha entre la capacidad instalada y el desempeño real. Es común que los sistemas que cumplen con metas promedio de producción presenten altos niveles de variabilidad que afectan la previsibilidad del flujo y la utilización eficiente de los recursos. Esta condición sugiere que la restricción principal no siempre está asociada a la infraestructura, sino al diseño del flujo y a la forma en que se distribuye el trabajo dentro del sistema.

El estudio se desarrolla en un proceso real de limpieza

y desinfección de contenedores reutilizables en una organización del sector logístico-farmacéutico en Puerto Rico. El sistema analizado presenta una producción promedio de 3.868 unidades por día, acompañada de una desviación estándar de 732 unidades, lo que evidencia una variabilidad significativa que compromete la estabilidad del flujo y la confiabilidad del suministro hacia los procesos aguas abajo. Adicionalmente, la asignación de recursos humanos responde a configuraciones históricas, sin una validación formal basada en el análisis de la capacidad y del comportamiento estadístico del proceso.

En este contexto, el objetivo de la investigación es evaluar y optimizar el flujo del proceso mediante la aplicación de la metodología DMAIC, analizando la relación entre los tiempos de ciclo, la variabilidad y la configuración de los recursos. Específicamente, se busca determinar si la capacidad efectiva del sistema permite cumplir de manera consistente con la demanda en distintos escenarios operacionales, así como identificar las condiciones necesarias para convertir la capacidad instalada en un desempeño estable y predecible.

Desde la perspectiva de la ingeniería industrial, este trabajo aporta evidencia empírica basada en datos reales, integrando análisis de capacidad, balance de línea y reducción de desperdicios en un entorno logístico altamente variable. Asimismo, contribuye a la literatura al demostrar que la utilización efectiva de recursos depende fundamentalmente del diseño del flujo, y no únicamente de la cantidad de personal asignado, proporcionando un marco metodológico replicable para sistemas productivos similares.

2 Metodología

2.1 Diseño de la investigación

Corresponde a una investigación aplicada, de enfoque cuantitativo y de tipo de estudio de caso, desarrollada en un entorno operativo real de una organización del sector logístico-farmacéutico en Puerto Rico. El objetivo metodológico fue analizar el desempeño del proceso de limpieza y desinfección de contenedores reutilizables en condiciones reales de operación, sin alterar las restricciones productivas ni regulatorias del sistema.

El horizonte temporal del estudio abarcó múltiples semanas de operación continua, lo que permitió capturar variaciones en la demanda diaria, cambios en la mezcla de contenedores y fluctuaciones en la asignación de recursos humanos. La meta operativa establecida por la organización fue de 3.868 unidades por día, valor utilizado como referencia para el análisis de la capacidad y el desempeño del proceso.

Las variables principales analizadas fueron: (i) tiempo de ciclo por unidad, (ii) productividad por operador (unidades/hora-persona), (iii) variabilidad del proceso (desviación estándar) y (iv) capacidad del sistema en relación con la demanda.

La investigación se estructuró bajo la metodología Lean Six Sigma, mediante el ciclo DMAIC (Define, Measure, Analyze, Improve, Control), que permite abordar problemas complejos con un enfoque sistemático basado en datos (George, 2002; McDermott y col., 2022).

2.2 Fase Definir (Define)

En esta fase se estableció el problema central del estudio, definido como la falta de alineación cuantitativa entre la variabilidad del proceso, la capacidad operativa y la asignación de recursos humanos. Aunque el sistema lograba cumplir con la producción promedio requerida, no existía evidencia que validara si la configuración de personal era óptima para mantener el desempeño en escenarios de variabilidad.

Se identificó como cliente principal el área de despacho, cuya necesidad crítica es contar con contenedores desinfectados disponibles de manera continua y confiable. A partir de esta necesidad, se definieron características críticas de calidad (CTQ), que incluyen el cumplimiento de la meta diaria, la estabilidad del tiempo de ciclo y la reducción de las interrupciones en el flujo.

Adicionalmente, se delimitó el alcance del estudio desde la recepción de contenedores sucios hasta el paletizado del producto desinfectado, sin considerar modificaciones en la infraestructura física ni en los requisitos regulatorios del proceso.

2.3 Fase Medir (Measure)

La fase Medir tuvo como propósito caracterizar el desempeño actual del proceso mediante la recolección y el análisis de datos operacionales. Se utilizaron registros históricos de producción diaria, datos de dotación de personal por turno y mediciones directas de tiempos de ciclo en planta.

Se construyeron indicadores clave, entre ellos la producción diaria, la productividad por operador y la distribución de los tiempos de ciclo. El análisis permitió identificar una producción promedio de 3.868 unidades diarias, con una desviación estándar de 732 unidades, lo que evidencia una variabilidad significativa en el sistema.

Asimismo, se evaluó la relación entre el número de operadores y la productividad individual, observándose un comportamiento inverso: el incremento del personal reducía la productividad por operador, lo que sugiere la presencia de interferencias operativas y un desequilibrio en la distribución del trabajo.

Se realizó, además, un estudio de tiempos, diferenciando entre tipos de contenedor e identificando diferencias significativas tanto en los promedios como en la dispersión, lo que permitió establecer el tipo de contenedor como una variable crítica del proceso.

2.4 Fase Analizar (Analyze)

En la fase Analizar se integraron herramientas de ingeniería industrial y de Lean Six Sigma para identificar las causas raíz de la variabilidad e ineficiencia del sistema. Se utilizó el mapeo de procesos para distinguir actividades de valor agregado (VA) y no de valor agregado (NVA), lo que evidenció una alta proporción de actividades asociadas al transporte, la espera y la inspección.

Se aplicaron la metodología de los “5 Why’s” y el análisis causa-efecto, identificando como causa raíz principal la ausencia de un sistema estructurado de medición y análisis que vincule la variabilidad del proceso con la asignación de recursos.

Adicionalmente, se realizó un análisis de capacidad del proceso, estimando la capacidad teórica del sistema en función de los cuellos de botella identificados. Los resultados mostraron índices de capacidad superiores a la unidad, lo que indicaba que la infraestructura disponible era suficiente para satisfacer la demanda y que la limitación principal se debía al diseño del flujo.

Como parte del análisis de riesgos, se implementó un análisis FMEA (Failure Mode and Effects Analysis), que permitió priorizar las fallas potenciales asociadas a actividades críticas del proceso, en particular las relacionadas con el registro, la manipulación y la continuidad operativa. Este análisis permitió identificar los puntos de intervención de mayor impacto en la estabilidad del sistema.

2.5 Fase Mejorar (Improve)

La fase Mejorar se centró en intervenir en las causas raíz identificadas mediante el rediseño del flujo operativo y la optimización de la asignación de recursos. Las acciones implementadas incluyeron:

(i) balance de línea para mejorar la continuidad del flujo, (ii) redefinición de roles operacionales con asignación fija en estaciones críticas, (iii) reducción de interrupciones mediante la automatización de microoperaciones y (iv) eliminación de actividades sin valor agregado.

La efectividad de las mejoras se evaluó mediante pruebas piloto en distintas configuraciones de personal. Se comparó el desempeño del sistema antes y después de la intervención, observándose mejoras significativas en el tiempo de ciclo promedio, una reducción de la variabilidad y una mayor estabilidad del flujo con una menor dotación de operadores.

2.6 Fase Control (Control)

La fase Control tuvo como objetivo asegurar la sostenibilidad de las mejoras implementadas mediante la estandarización del proceso y la definición de indicadores de desempeño.

Se establecieron métricas clave, incluyendo el tiempo de ciclo objetivo, el cumplimiento de la producción diaria y

los límites operacionales de variabilidad. Asimismo, se implementaron rutinas de monitoreo continuo, auditorías operacionales y caminatas Gemba para verificar el cumplimiento del método estandarizado.

Estos mecanismos permiten detectar desviaciones de manera temprana y asegurar que el sistema mantenga un desempeño estable a lo largo del tiempo, alineando la capacidad operativa con la demanda del proceso.

En conjunto, la aplicación estructurada de la metodología DMAIC permitió transformar datos operacionales en decisiones basadas en evidencia, identificar oportunidades de mejora y validar configuraciones de recursos que optimizan el desempeño del sistema en condiciones reales de variabilidad.

3 Discusión y resultados

3.1 Comportamiento de la producción y variabilidad del sistema

El análisis de la producción diaria evidenció que el sistema opera con un promedio de 3.868 unidades por día, acompañado de una desviación estándar de 732 unidades, lo que representa aproximadamente un 19 % de variación relativa. Este nivel de dispersión indica que, aunque el proceso cumple la meta promedio, presenta una inestabilidad significativa en su desempeño.

Como se muestra en la Figura 1, la producción diaria presenta fluctuaciones recurrentes alrededor del valor objetivo, lo que evidencia una alta dispersión en el sistema.

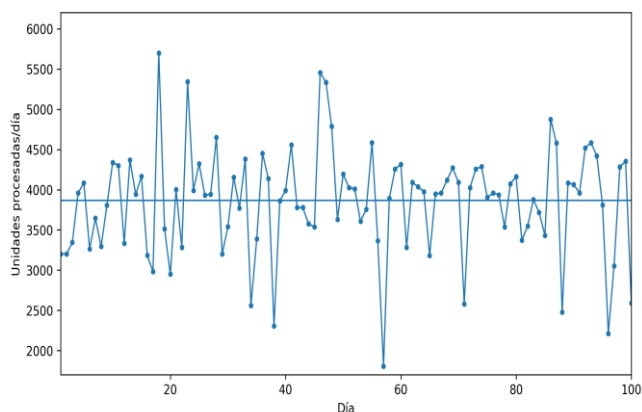


Fig. 1. Producción diaria del proceso de limpieza y desinfección, comparada con la meta operativa (3.868 unidades/día), lo que evidencia la variabilidad del sistema.

Desde la perspectiva del control estadístico de procesos, esta variabilidad sugiere la presencia de causas comunes y, potencialmente, de causas especiales que afectan la consistencia del flujo (Montgomery, 2020). Este comportamiento es consistente con lo reportado en sistemas logísti-

cos bajo condiciones de incertidumbre, donde la variabilidad de las entradas y de los tiempos de procesamiento impacta directamente en la confiabilidad del sistema (Ivanov, 2021).

La presencia de múltiples días por debajo de la meta operativa confirma que el cumplimiento promedio no garantiza estabilidad ni capacidad de respuesta ante las fluctuaciones, lo que refuerza la necesidad de analizar el sistema desde una perspectiva de capacidad efectiva y no únicamente del rendimiento medio.

3.2 Relación entre dotación de personal y productividad

El análisis de la productividad por operador reveló una relación inversa entre el número de trabajadores asignados y el rendimiento individual. Con una configuración de cinco operadores, la productividad promedio se situó en aproximadamente 97 unidades por hora por persona; con cuatro operadores aumentó a cerca de 121, y con tres operadores alcanzó valores cercanos a 161 unidades por hora por persona. La Figura 2 muestra claramente la relación inversa entre el número de operadores y la productividad individual del sistema.

Este comportamiento indica la presencia de ineficiencias asociadas a interferencias operativas, tiempos de espera y desequilibrios en la distribución del trabajo. Desde la perspectiva Lean, este fenómeno puede explicarse por la generación de desperdicios de tipo de espera y de movimiento, así como por la falta de sincronización entre estaciones (Womack y col., 1997; Negrão y col., 2017).

Estos resultados evidencian que el incremento de recursos no necesariamente mejora el desempeño global del sistema, y que, en ausencia de un flujo balanceado, puede incluso deteriorar la utilización efectiva de la mano de obra.

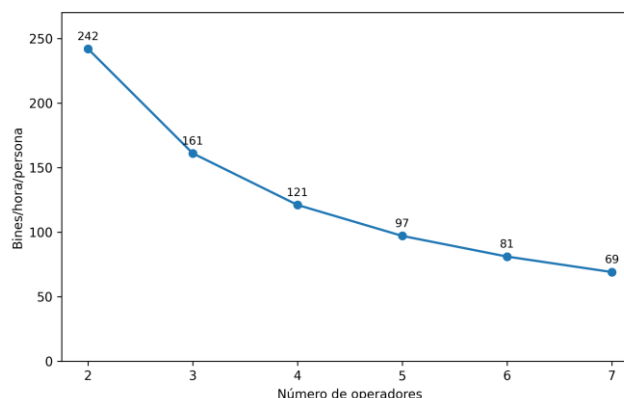


Fig. 2. Relación entre el número de operadores y la productividad individual, que muestra un comportamiento inverso asociado a interferencias operativas y al desequilibrio del flujo.

3.3 Análisis de tiempos de ciclo y variabilidad por tipo de contenedor

El estudio de los tiempos de ciclo permitió identificar diferencias significativas entre los tipos de contenedor. Los contenedores de tipo A presentaron un tiempo promedio de procesamiento de aproximadamente 29 segundos, con baja dispersión, mientras que los de Tipo B registraron un promedio de 42 segundos, acompañado de una desviación estándar considerablemente mayor.

Adicionalmente, se identificaron eventos extremos en los contenedores Tipo B, con tiempos superiores a 200 segundos, lo que afecta negativamente la continuidad del flujo y contribuye a la variabilidad global del sistema. La distribución de los tiempos de ciclo se presenta en la Figura 3, donde se observa la mayor dispersión y la presencia de valores extremos en los contenedores Tipo B.

Este comportamiento confirma que la mezcla de productos constituye una fuente crítica de variabilidad, un fenómeno ampliamente documentado en sistemas de producción con heterogeneidad en los tiempos de procesamiento (Katirae y col., 2023). En este contexto, los contenedores Tipo B actúan como elementos dominantes del flujo, fijan el ritmo del sistema y generan acumulaciones en estaciones críticas.

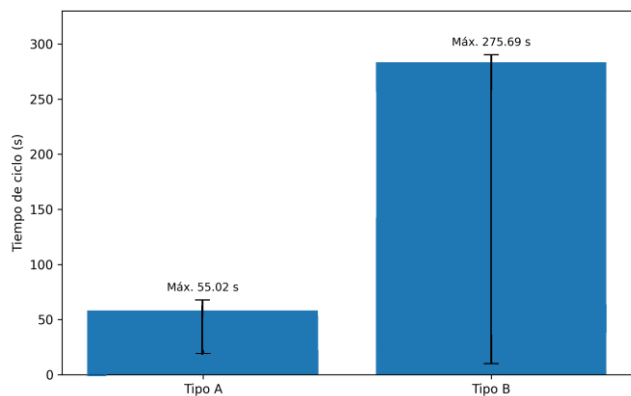


Fig. 3. Distribución de tiempos de ciclo por tipo de contenedor, evidenciando mayor variabilidad y presencia de valores extremos en los contenedores Tipo B.

3.4 Capacidad del proceso y restricción operativa

El análisis de capacidad del proceso mostró que la capacidad teórica del sistema supera la demanda diaria. Para los contenedores tipo A se estimó una capacidad aproximada de 4.200 unidades por día, mientras que para los Tipo B se obtuvo una capacidad cercana a 5.040 unidades por día, ambos valores superiores a la meta de 3.868 unidades. La Figura 4 compara la capacidad estimada del proceso con la demanda operativa diaria y evidencia que la capacidad ins-

talada supera los requerimientos del sistema.

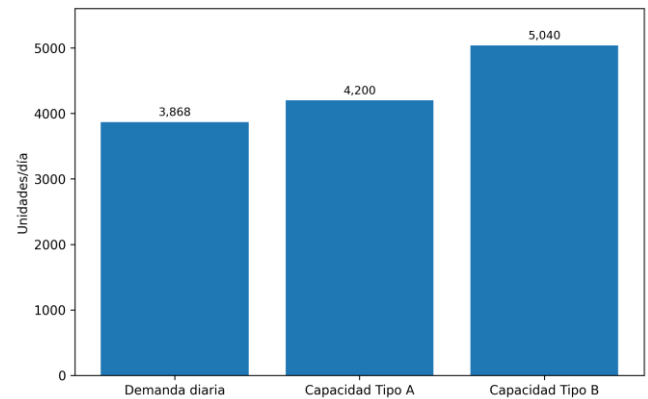


Fig. 4. Comparación entre la capacidad del proceso y la demanda operativa.

Estos resultados indican, además, que la restricción principal del sistema no es la infraestructura ni la capacidad instalada, sino el diseño del flujo y la forma en que se gestionan las interacciones entre actividades. Este hallazgo es consistente con estudios recientes que destacan que la viabilidad operativa depende no solo de la capacidad nominal, sino también de la capacidad efectiva bajo condiciones de variabilidad (Dolgui y col., 2019).

3.5 Evaluación del piloto sin rediseño del flujo

Durante un piloto inicial en el que se redujo la dotación de cinco a cuatro operadores sin modificar el método de trabajo, se observó un incremento significativo en el tiempo de ciclo de los contenedores Tipo B, que alcanzó valores cercanos a 55 segundos.

El impacto de la reducción de operadores, sin rediseño del flujo, en el tiempo de ciclo se muestra en la figura 5.

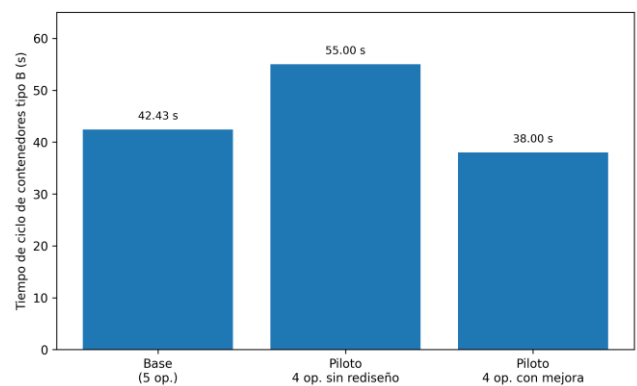


Fig. 5. Impacto de la reducción de operadores, sin rediseño del flujo, en el tiempo de ciclo, evidenciando un aumento de la variabilidad y una pérdida de estabilidad del proceso.

Este resultado evidencia que la reducción de recursos, sin intervención en el diseño del flujo, amplifica la variabilidad y desplaza los cuellos de botella hacia las actividades más sensibles del proceso. Aunque el sistema logró cumplir con la producción diaria en términos absolutos, el comportamiento observado mostró una alta dispersión e inestabilidad, lo que indicaba que el desempeño no era sostenible.

Este hallazgo confirma que la eficiencia operativa no puede lograrse únicamente mediante la reducción de recursos, sino que requiere una reconfiguración estructural del sistema (McDermott y col., 2022).

3.6 Impacto de las mejoras en el desempeño del sistema

Tras la implementación de mejoras basadas en balance de línea, redefinición de roles, reducción de interrupciones y eliminación de actividades sin valor agregado, se llevó a cabo un segundo piloto bajo la misma dotación de cuatro operadores.

Los resultados mostraron una reducción del tiempo de ciclo promedio de los contenedores Tipo B a aproximadamente 38 segundos, lo que representa una mejora cercana al 30 %. La Figura 6 ilustra la evolución del tiempo de ciclo en distintos escenarios operativos. Adicionalmente, se observó una disminución de la dispersión de los tiempos y una mayor estabilidad del flujo.

Estos resultados demuestran que la estabilidad del sistema depende principalmente del diseño del flujo y no de la cantidad de recursos disponibles. La estandarización de roles y la eliminación de interferencias operativas permitieron transformar la capacidad potencial en desempeño efectivo, alineando el sistema con los principios del flujo continuo y de la mejora Lean (Chiarini y col., 2018).

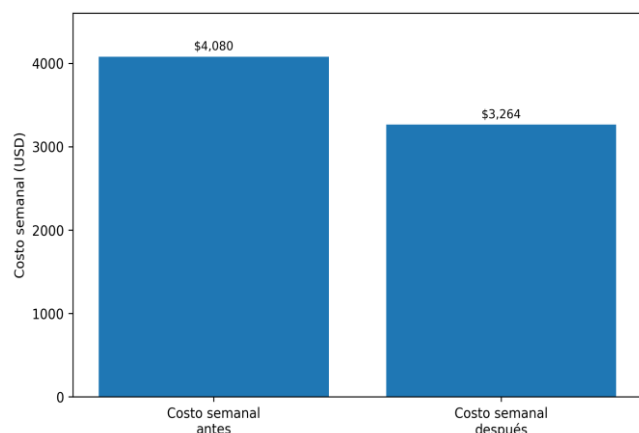


Fig. 6. Evolución del tiempo de ciclo bajo diferentes configuraciones operativas, mostrando la mejora obtenida mediante el balance de línea y la estandarización del flujo.

3.7 Análisis económico de la mejora

Desde el punto de vista económico, la optimización del proceso permitió reducir el costo operativo semanal asociado a la mano de obra, generando un ahorro aproximado de \$816 por semana, equivalente a \$42.432 al año.

La inversión requerida para implementar las mejoras se recuperó en menos de un mes, lo que evidencia la viabilidad financiera de la intervención. Este resultado refuerza la premisa de que las mejoras basadas en el rediseño del flujo pueden generar beneficios significativos sin requerir inversiones sustanciales en infraestructura.

3.8 Discusión general

Los resultados obtenidos demuestran que el desempeño del sistema está determinado por la interacción entre la variabilidad, el flujo y la asignación de recursos, más que por la capacidad instalada en sí misma. En este sentido, el estudio aporta evidencia empírica que refuerza la importancia de abordar los problemas de eficiencia desde una perspectiva sistémica.

A diferencia de enfoques tradicionales que asocian mejoras en la productividad con incrementos de recursos, este trabajo demuestra que la reducción de personal es viable únicamente cuando el flujo ya se ha estabilizado. Este hallazgo contribuye a la literatura al evidenciar que la capacidad efectiva depende del diseño del sistema y de la gestión de la variabilidad.

En conjunto, los resultados confirman que la aplicación estructurada de DMAIC permite transformar sistemas operacionales con alta variabilidad en procesos estables, predecibles y económicamente sostenibles y proporciona un marco replicable para optimizar procesos en entornos logísticos y productivos.

4 Conclusion

El presente estudio demostró que la aplicación estructurada de la metodología DMAIC permitió transformar un sistema logístico de alta variabilidad en un proceso más estable, eficiente y económicamente viable. A partir del análisis integrado de producción, tiempos de ciclo y capacidad, se evidenció que el desempeño del sistema no estaba limitado por la capacidad instalada, sino por la configuración del flujo operativo y la gestión de la variabilidad.

Los resultados mostraron que, aunque el proceso cumplía con la demanda promedio, presentaba una dispersión significativa que comprometía su estabilidad. Este hallazgo confirma que el cumplimiento de metas operativas no constituye un indicador suficiente de eficiencia, por lo que es necesario evaluar la capacidad del sistema en condiciones

reales de variabilidad.

Asimismo, se comprobó que el incremento de la dotación de personal no garantiza mejoras en la productividad. Por el contrario, en ausencia de un flujo equilibrado, puede generar interferencias operativas que reduzcan el rendimiento individual y afecten el desempeño global. Este resultado refuerza la importancia del balance de línea y de la estandarización de tareas como elementos críticos para la optimización de procesos.

El análisis de tiempos de ciclo evidenció que la variabilidad en los tipos de contenedor constituye una fuente dominante de inestabilidad, particularmente en los de mayor dispersión y presencia de valores extremos. En este sentido, la mezcla operativa y la heterogeneidad del trabajo deben considerarse variables clave en el diseño de sistemas productivos.

Uno de los aportes más relevantes del estudio es la demostración de que la reducción de recursos es viable únicamente cuando va acompañada de un rediseño del flujo. La implementación de mejoras basadas en el balance de línea, la eliminación de actividades sin valor agregado y la reducción de interrupciones permitieron disminuir el tiempo de ciclo y estabilizar el sistema, lo que validó la hipótesis de que la eficiencia operativa depende principalmente del diseño del proceso y no de la cantidad de recursos disponibles.

Desde el punto de vista económico, las mejoras implementadas generaron una reducción significativa de los costos operativos, con un periodo de recuperación corto, lo que confirma la viabilidad financiera de intervenciones basadas en el rediseño del flujo sin necesidad de inversiones en infraestructura.

En términos de contribución, este trabajo aporta evidencia empírica sobre la relación entre variabilidad, capacidad y flujo en sistemas logísticos y propone un enfoque integrado que combina Lean Six Sigma con el análisis de capacidad para evaluar el desempeño real de los procesos. Este enfoque es replicable en entornos industriales y de servicios, donde la variabilidad y la asignación de recursos inciden directamente en la eficiencia operativa.

Como líneas futuras de investigación, se recomienda incorporar modelos predictivos que permitan anticipar la variabilidad del sistema, así como integrar herramientas de simulación y análisis en tiempo real para fortalecer la toma de decisiones operativas. Asimismo, la inclusión de indicadores de desempeño dinámicos podría contribuir a una gestión más robusta y adaptativa de procesos complejos.

References

McDermott, O., Antony, J., Bhat, S., Jayaraman, R., Rosa, A., Marolla, G., & Parida, R. (2022). Lean six sigma in healthcare: a systematic literature review on motiva-

- tions and benefits. *Processes*, 10(10), 1910. <https://doi.org/10.3390/pr10101910>
- Chiarini, A., Baccarani, C., & Mascherpa, V. (2018). Lean production, Toyota Production System and Kaizen philosophy: A conceptual analysis from the perspective of Zen Buddhism. *The TQM Journal*, 30(4), 425-438. <https://doi.org/10.1108/TQM-12-2017-0178>
- Costa, L. B. M., Godinho Filho, M., Fredendall, L. D., & Paredes, F. J. G. (2018). Lean, six sigma and lean six sigma in the food industry: A systematic literature review. *Trends in Food Science & Technology*, 82, 122-133. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2018.10.002>
- Dolgui, A., Ivanov, D., Sethi, S. P., & Sokolov, B. (2019). Scheduling in production, supply chain and Industry 4.0 systems by optimal control: fundamentals, state-of-the-art and applications. *International journal of production research*, 57(2), 411-432. <https://doi.org/10.1080/00207543.2018.1442948>
- George, M. L. (2002). *Lean Six Sigma: Combining Six Sigma quality with Lean speed*. McGraw-Hill.
- Henrique, D. B., & Godinho Filho, M. (2020). A systematic literature review of empirical research in Lean and Six Sigma in healthcare. *Total Quality Management & Business Excellence*, 31(3-4), 429-449. <https://doi.org/10.1080/14783363.2018.1429259>
- Ivanov, D. (2021). Supply chain viability and the COVID-19 pandemic: A conceptual and formal generalisation of four major adaptation strategies. *International Journal of Production Research*, 59(12), 3535-3552. <https://doi.org/10.1080/00207543.2021.1890852>
- Katirae, N., Calzavara, M., Finco, S., Battaia, O., & Battini, D. (2023). Assembly line balancing and worker assignment considering workers' expertise and perceived physical effort. *International Journal of Production Research*, 61(20), 6939-6959. <https://doi.org/10.1080/00207543.2022.2140219>
- Montgomery, D. C. (2020). *Introduction to statistical quality control*. John Wiley & sons.
- Negrão, L. L. L., Godinho Filho, M., & Marodin, G. (2017). Lean practices and their effect on performance: a literature review. *Production Planning & Control*, 28(1), 33-56. <https://doi.org/10.1080/09537287.2016.1231853>
- Psomas, E., & Antony, J. (2017). Total quality management elements and results in higher education institutions: The Greek case. *Quality Assurance in Education*, 25(2), 206-223.
- Tampubolon, S., & Purba, H. H. (2021). Lean six sigma implementation, a systematic literature review. *International Journal of Production Management and Engineering*, 9(2), 125-139. <https://doi.org/10.4995/ijpme.2021.14561>
- Sreedharan, V. R., Pattusamy, M., Mohan, S., & Persis, D. J. (2020). A systematic literature review of Lean Six Sigma in financial services: key finding and analysis. *International Journal of Business Excel-*

- lence, 21(3), 331-358. <https://doi.org/10.1504/IJBEX.2020.108207>
- Tortorella, G. L., de Castro Fettermann, D., Frank, A., & Marodin, G. (2018). Lean manufacturing implementation: leadership styles and contextual variables. *International Journal of Operations & Production Management*, 38(5), 1205-1227. <https://doi.org/10.1108/IJOPM-08-2016-0453>
- Womack, J. P., & Jones, D. T. (1997). Lean thinking—banish waste and create wealth in your corporation. *Journal of the operational research society*, 48(11), 1148-1148.
- Recibido:** 26 de febrero de 2026
- Aceptado:** 6 de junio de 2026
- Ortiz, Gisela:** BSc. in Industrial Engineering, 2026, Universidad Politécnica de Puerto Rico, San Juan, PR, USA. Email: ortiz_131760@students.pupr.edu
 <https://orcid.org/0009-0007-8355-7689>
- Medero, Pamela:** BSc. in Industrial Engineering, 2026, Universidad Politécnica de Puerto Rico. San Juan, PR, USA. E-mail: medero_132378@students.pupr.edu
-  <https://orcid.org/0009-0008-6341-5859>
- Olivares Lugo, Luis:** M.E., in Systems Management, mention: Artificial Intelligence, 1999, Universidad de Puerto Rico. Professor for the Industrial and Systems Engineering Department, at the Polytechnic University of Puerto Rico. San Juan, PR-USA. E-mail: LOlivares@pupr.edu
 <https://orcid.org/0009-0009-2283-5862>
- Garcia, Maria:** Ph.D. in Education, 2012, Ana G. Méndez University. Department Head, and Professor of Industrial Engineering Department, at the Universidad Politécnica de Puerto Rico. San Juan, PR, USA. E-mail: margar-cia@pupr.edu
 <https://orcid.org/0000-0002-7134-3057>
- Rondón Contreras, Jairo:** Ph.D. in Applied Chemistry, mention: Materials Study, 2015, Universidad de Los Andes. Professor of Biomedical & Chemical Engineering Departments, at the Polytechnic University of Puerto Rico. San Juan, PR-USA.
 <https://orcid.org/0000-0002-9738-966X>