

Año VI, v.1 2026 | Envío: 22/02/2026 | Aceptado: 24/02/2026 | Publicación: 26/02/2026 Identificación y cuantificación de los siete desperdicios (muda) en el ensamblaje estructural de aeronaves: un enfoque sistémico basado en la manufactura esbelta

Identificación y cuantificación de los siete desperdicios (Muda) en el ensamblaje estructural de aeronaves: un enfoque sistémico basado en la metodología Lean.

Madison Leandro Farias de Carvalho – Miembro de AIAA n.º 1857656 Fundador e ingeniero principal – Aerostructure Systems & Lean Solutions LLC (EE. UU.), madison.carvalho@outlook.com

Resumen

El ensamblaje estructural de aeronaves es uno de los entornos de producción más complejos de la manufactura contemporánea, caracterizado por un bajo volumen, una alta variedad de productos, una elevada criticidad estructural y exigentes requisitos normativos. En este contexto, los siete desperdicios (Muda) descritos por Lean Manufacturing se manifiestan de formas particulares, a menudo intensificadas por la variabilidad operativa y la saturación de la capacidad. Este estudio examina la identificación y cuantificación de estos desperdicios en los procesos de ensamblaje estructural de aeronaves mediante un enfoque híbrido que articula los fundamentos conceptuales de Lean, la Teoría de las Restricciones y el análisis cuantitativo del desempeño productivo. A partir de un estudio de caso realizado en una línea de ensamblaje estructural, se midieron indicadores relacionados con el tiempo de ciclo, el trabajo en curso (WIP), la tasa de retrabajo y el tiempo improductivo asociado a la espera y el movimiento. Los resultados indican que la variabilidad operativa actúa como un multiplicador sistémico de desperdicios, afectando directamente el tiempo de entrega y la estabilidad del flujo de producción. La aplicación estructurada de las herramientas Lean, combinada con el análisis cuantitativo, permitió una reducción estimada de los desperdicios críticos y una mejora significativa del desempeño sistémico. Los resultados contribuyen a la literatura al esbozar un método integrado para identificar y cuantificar el Muda en entornos aeroespaciales de alta complejidad.

Palabras clave: Producción ajustada (Lean Manufacturing); siete tipos de desperdicio; ensamblaje estructural; variabilidad operativa; industria aeroespacial.

Abstracto

El ensamblaje estructural de aeronaves constituye uno de los entornos de fabricación más complejos, caracterizado por un bajo volumen de producción, una amplia variedad de productos, una criticidad estructural y estrictos requisitos normativos. En este contexto, los siete desperdicios (Muda) definidos en Lean Manufacturing adoptan formas específicas que varían según el contexto, a menudo intensificadas por la variabilidad operativa y la saturación de la capacidad. Este estudio examina la identificación y cuantificación de los siete desperdicios en los procesos de ensamblaje estructural aeroespacial mediante un enfoque híbrido que integra los fundamentos teóricos de Lean, la Teoría de las Restricciones y el análisis cuantitativo del desempeño. Un estudio de caso realizado en una línea de ensamblaje estructural evaluó el tiempo de ciclo, el trabajo en curso (WIP), la tasa de retrabajo y el tiempo improductivo asociado a la espera y el movimiento. Los resultados muestran que la variabilidad operativa actúa como un multiplicador sistémico del desperdicio, influyendo directamente en el tiempo de entrega y la estabilidad del flujo de producción. La aplicación estructurada de las prácticas Lean, combinada con la evaluación cuantitativa, permitió reducciones cuantificables en las categorías críticas de desperdicio y generó mejoras significativas en el desempeño sistémico. Estos hallazgos contribuyen a la literatura existente al proponer un método integrado para la identificación y cuantificación de Muda en entornos complejos de fabricación aeroespacial.

Palabras clave: Producción ajustada (Lean Manufacturing); siete tipos de desperdicio; ensamblaje estructural; variabilidad operativa; industria aeroespacial.

1. INTRODUCCIÓN

El ensamblaje estructural de las aeronaves difiere sustancialmente de los sistemas tradicionales.



Año VI, v.1 2026 | Envío: 22/02/2026 | Aceptado: 24/02/2026 | Publicación: 26/02/2026 de producción en masa, tanto en su lógica operativa como en las limitaciones técnicas que impone.

Ellos gobiernan. Este entorno productivo se caracteriza por una alta dependencia de las operaciones manuales.

precisión, estricto cumplimiento de tolerancias dimensionales estrictas, realización de inspecciones

obligatorio en múltiples etapas y fuerte interdependencia entre procesos consecutivos.

A diferencia de las líneas altamente automatizadas y repetitivas, el ensamblaje estructural aeronáutico

Funciona en condiciones de variabilidad inherente, en las que pequeñas perturbaciones pueden tener repercusiones.

una forma expandida a lo largo de todo el flujo de producción. Como consecuencia, el sistema se vuelve particularmente

sensible a la variabilidad operativa y a la formación de residuos sistémicos, cuya

La identificación no siempre es inmediata.

En este contexto, el concepto de los siete desperdicios: sobreproducción, espera, transporte,

El sobreprocesamiento, el inventario, el movimiento y los defectos son principios fundamentales de la metodología Lean.

Fabricación y sigue siendo ampliamente reconocido como un marco analítico para la comprensión

ineficiencias productivas. Sin embargo, cuando se trasladan a entornos aeroespaciales de alta tecnología

En términos de complejidad, este marco se aplica a menudo de forma predominantemente cualitativa.

centrarse en observaciones visuales, diagnósticos puntuales o iniciativas de mejora local.

Esta limitación reduce la capacidad de comprender la dinámica general del sistema de producción, especialmente en

Escenarios en los que múltiples restricciones interactúan simultáneamente. La ausencia de cuantificación.

Esta estructura dificulta aún más la priorización de las intervenciones y la evaluación objetiva de sus efectos sobre...

con el tiempo.

Sistemas de producción complejos caracterizados por una alta utilización de recursos críticos.

Exhiben un comportamiento sensible a la variabilidad, que a menudo se describe mediante relaciones no conformistas.

Relaciones lineales entre carga, capacidad y rendimiento. En estas condiciones, se producen pequeñas fluctuaciones operativas.

Pueden provocar la formación de colas, un aumento del trabajo en curso y tiempos de ciclo más largos.

y la inestabilidad en el flujo de producción. Estos efectos amplifican la manifestación del desperdicio.

originalmente descritos por Lean, transformándolos en fenómenos sistémicos que van más allá

escala de operaciones individuales. En consecuencia, los enfoques basados únicamente en

La identificación visual de Muda resulta insuficiente para respaldar procesos consistentes de

mejora continua, especialmente en entornos donde existen limitaciones y requisitos estructurales

Las regulaciones limitan los grados de libertad operativos.

La bibliografía sobre Lean en el ámbito aeroespacial pone de relieve avances significativos en materia de adaptación.

de herramientas de mejora clásicas, pero aún revela lagunas con respecto a la integración entre el análisis

Medición conceptual y cuantitativa del desempeño sistémico. En particular, sigue limitada a

La articulación entre los principios de Lean Manufacturing y los enfoques que consideran explícitamente...

La dinámica de las restricciones y la variabilidad, como la Teoría de las Restricciones. La convergencia entre estas

Los marcos de referencia ofrecen el potencial para una comprensión más completa de los mecanismos por los cuales



Año VI, v.1 2026 | Envío: 22/02/2026 | Aceptado: 24/02/2026 | Publicación: 26/02/2026 Los residuos surgen, se acumulan y afectan el rendimiento general del sistema de producción.

Dado este escenario, el presente estudio propone un enfoque híbrido para la identificación y Cuantificación de los siete tipos de desperdicio en el ensamblaje estructural de aeronaves, combinando la justificación. Marco conceptual Lean, principios de la Teoría de las Restricciones y análisis cuantitativo de las métricas de rendimiento. productivo. La propuesta busca no solo reconocer la presencia de Muda, sino también medir su magnitud, comprender sus mecanismos de propagación y evaluar sus impactos en las variables. Los problemas críticos incluyen el tiempo de ciclo, el trabajo en curso, el retrabajo y la estabilidad del flujo de trabajo. Al integrar Considerando tanto las dimensiones cualitativas como cuantitativas, el objetivo es ofrecer un marco analítico capaz de brindar apoyo. Decisiones para la mejora con mayor solidez sistémica.

Se espera que esto contribuya a avanzar en la comprensión de los residuos en entornos aeroespaciales complejos, proporcionando una base metodológica que permite la transición desde Identificación descriptiva para la cuantificación estructurada de Muda. Se demuestra que esta transición es... particularmente relevante en sistemas donde la eficiencia operativa depende no solo de Eliminar las ineficiencias locales, pero también estabilizar el flujo de producción general.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Producción ajustada y los siete desperdicios

La manufactura esbelta se estructura en torno al principio de eliminar sistemáticamente... Actividades que no agregan valor al producto ni al flujo de producción. Los siete desperdicios. Los identificados originalmente en el Sistema de Producción Toyota fueron concebidos en un entorno Se caracteriza por la producción repetitiva, la alta estandarización y la relativa estabilidad de la demanda. Sin embargo, cuando se aplican a contextos aeroespaciales, estos mismos conceptos requieren... Adaptación conceptual, dada la naturaleza de bajo volumen, alta mezcla y alta criticidad. Los cambios estructurales modifican tanto el origen como la dinámica de la manifestación de los residuos. En este escenario, la simple aplicación directa de las categorías clásicas de Muda resulta insuficiente para para capturar la complejidad sistémica presente en el ensamblaje estructural aeronáutico, lo que hace necesario una lectura que tiene en cuenta la variabilidad operativa, las limitaciones de capacidad y los requisitos. requisitos reglamentarios específicos.

2.2 Particularidades del ensamblaje estructural aeronáutico

El ensamblaje estructural de una aeronave posee una serie de características que la distinguen. procedente de otros entornos industriales y que influye directamente en la forma en que se generan los residuos.



Año VI, v.1 2026 | Envío: 22/02/2026 | Aceptado: 24/02/2026 | Publicación: 26/02/2026 Entre estas características, destaca la compleja secuenciación de operaciones, frecuentemente limitados por rígidas dependencias técnicas; la fuerte presencia de inspecciones no destructivas como Requisito para la liberación de pasos críticos; la necesidad de cumplir con los requisitos documentales. extenso, asociado con la trazabilidad y el cumplimiento normativo; y la incidencia de retrabajo. resultantes de no conformidades estructurales identificadas a lo largo del proceso. Estos elementos no solo aumentan la sensibilidad del sistema a la variabilidad, sino que también reconfiguran el manifestación práctica de cada tipo de residuo, trasladándolos de eventos localizados a fenómenos que impactan en el desempeño general del flujo de producción.

2.3 Variabilidad, capacidad y amplificación de los residuos

Los modelos de sistemas de producción con capacidad finita indican que, a medida que aumenta la tasa de La utilización de los recursos críticos se acerca al 100%, con pequeñas variaciones en los tiempos. El procesamiento tiende a producir un crecimiento no lineal, a menudo exponencial, de Tiempos de espera. En este contexto, se consideran desperdicios tradicionalmente observados, como la espera y el inventario. Comienzan a reflejar no solo las ineficiencias operativas locales, sino sobre todo la presencia de restricciones. La variabilidad amplifica la dinámica sistémica. Comprender esta dinámica cambia el enfoque analítico. Desde la simple identificación de Muda hasta el análisis integrado de capacidad, flujo y estabilidad. operativo, una condición necesaria para las intervenciones que producen mejoras sostenibles en entornos de producción complejos

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Diseño de la investigación

El presente estudio se realizó a través de un único estudio de caso llevado a cabo en línea. del ensamblaje estructural aeronáutico, adoptando un enfoque cuantitativo integrado. y cualitativa. Esta estrategia metodológica fue seleccionada debido a la necesidad de comprender, Al mismo tiempo, los aspectos medibles del desempeño productivo y la dinámica operativa que Conducen a la formación de residuos en un entorno de producción real. La combinación de La observación contextual y el análisis numérico nos permitieron examinar el fenómeno de forma sistémica. preservando la complejidad inherente del proceso investigado.

La identificación de los siete residuos se estructuró en función de su operacionalización en Indicadores cuantitativos directamente observables en el proceso de producción. Cada categoría de Los residuos se asociaron con una métrica específica para permitir su medición objetiva y comparable a lo largo de todo el flujo de ensamblaje estructural. Por lo tanto, la sobreproducción estuvo representada por Órdenes iniciadas antes de la liberación completa de las condiciones necesarias; la espera se midió por tiempo improductivo por operación; el transporte se evaluó por la distancia promedio recorrida por subconjunto; el sobreprocesamiento se estimó debido a horas adicionales no previstas en el plan; el El inventario se caracterizó por el trabajo en proceso (WIP) promedio entre estaciones; el movimiento fue observados a través de movimientos repetitivos por ciclo; y los defectos se cuantificaron por la tasa. porcentaje de retrabajo. Esta estructura de indicadores permitió la conversión de categorías conceptuales de Cambios en variables analíticas que pueden tratarse cuantitativamente.

3.3 Recopilación de datos

La recopilación de datos se centró en obtener información representativa sobre Comportamiento operativo de la línea de montaje. Se tomaron muestras del tiempo de ciclo. con un tamaño de muestra superior a 30 observaciones, lo que permite la estimación de parámetros. Se utilizaron métodos estadísticos básicos, como la media y la desviación estándar. Simultáneamente, se midió el trabajo realizado. en proceso (WIP) entre estaciones, al estudio de la tasa de retrabajo asociada con no- conformidades estructurales y el registro sistemático de los tiempos de espera observados en todo el operaciones. El conjunto de estas mediciones proporcionó una base empírica para el análisis integrado entre Variabilidad, capacidad y generación de residuos.

3.4 Procedimiento analítico

El tratamiento analítico de los datos siguió una secuencia estructurada de pasos. Inicialmente, Se creó un diagrama de flujo de procesos que permite visualizar las relaciones de precedencia y los tiempos. Puntos de acumulación operativos y potenciales. A continuación, la cuantificación de... variabilidad asociada con los tiempos de ciclo y las condiciones de operación. La tercera etapa consistió en al calcular la utilización de recursos críticos, un elemento central para comprender las limitaciones. sistémico. Finalmente, se realizó un análisis de correlación entre la variabilidad operativa y la formación de residuos, buscando resaltar las relaciones de dependencia capaces de explicar los impactos observados. en el desempeño general del flujo de producción.



4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El análisis reveló patrones consistentes en la manifestación de los residuos a lo largo de la línea. ensamblaje estructural. Se observó una alta incidencia de tiempos de espera directamente asociados con esto. para realizar inspecciones críticas, indicando la presencia de puntos de liberación con capacidad. influencia limitada y fuerte en la continuidad del flujo de producción. De manera convergente, Se detectó un alto nivel de trabajo en curso (WIP, por sus siglas en inglés) en las estaciones ubicadas en las cercanías. a partir de restricciones sistémicas, lo que sugiere una acumulación resultante de desequilibrios de capacidad. También se descubrió que la reelaboración estructural contribuyó significativamente a la procesamiento excesivo, extendiendo el consumo de horas productivas más allá de lo planeado en planificación. Además, hubo un registro de movimiento suplementario vinculado a una disposición física no optimizada, con impactos directos en el tiempo operativo y la eficiencia de fluir.

Después de implementar intervenciones basadas en principios Lean, incluyendo: equilibrio de carga entre estaciones, sincronización de las actividades de inspección y estandarización. Desde el punto de vista operativo, se observaron mejoras cuantificables en los principales indicadores analizados. Se proyectó una reducción estimada del 32% en los tiempos de espera, acompañada de una disminución del 27% en el trabajo en curso (WIP, por sus siglas en inglés). intermedio. La tasa de retrabajo mostró una reducción del 18%, lo que indica un efecto positivo en el Estabilidad del proceso y calidad estructural. En términos sistémicos, la mejora general del plomo. Se estimó que el plazo sería de entre el 25% y el 35%, lo que refleja el efecto combinado de las intervenciones. En lo que respecta a la variabilidad, la capacidad y la continuidad del flujo de producción.

5. DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos indican que los desechos no ocurren de forma aislada, sino a través de relaciones interdependientes que afectan el comportamiento general del sistema de producción. La variabilidad operativa aumenta la probabilidad de formación de colas, amplificando simultáneamente El desperdicio asociado con la espera y la acumulación de inventario intermedio. De manera similar, el La aparición de defectos conlleva la necesidad de reelaboración y, en consecuencia, de procesamiento excesivo, lo que aumenta el uso de los recursos del sistema y contribuye a la retroalimentación de Restricciones existentes. Esta cadena de eventos pone de relieve que la dinámica de los residuos debe ser entendido como un fenómeno sistémico, y no como un conjunto de sucesos independientes.

En este contexto, la integración entre los principios de Lean Manufacturing y el análisis cuantitativo de El rendimiento resultó crucial para comprender las interacciones observadas. En entornos

Año VI, v.1 2026 | Envío: 22/02/2026 | Aceptado: 24/02/2026 | Publicación: 26/02/2026
aeroespacial caracterizado por una alta complejidad técnica y estrictas restricciones operativas, un

La identificación visual de Muda resulta insuficiente para guiar las decisiones de mejora con consistencia. Por lo tanto, es necesario un enfoque sistémico basado en datos, capaz de Relacionar la variabilidad, la capacidad y la generación de residuos dentro de un marco analítico coherente. con la realidad productiva investigada.

CONSIDERACIONES FINALES

Este estudio aporta un conocimiento al proponer un método estructurado para la identificación. y cuantificación de los siete residuos en el contexto del ensamblaje estructural de aeronaves. La adopción de Un enfoque híbrido permitió demostrar, sobre una base empírica, la relación entre la variabilidad. operacional, saturación de capacidad y amplificación de residuos, lo que permite la interpretación de tales Los elementos se integran en el funcionamiento sistémico del proceso de producción.

Los resultados obtenidos tienen implicaciones relevantes para las iniciativas de mejora. desempeño en un sector de importancia estratégica para la economía y la seguridad nacional, especialmente debido a la necesidad de conciliar la eficiencia operativa, la fiabilidad estructural y cumplimiento normativo. Como resultado, futuras investigaciones podrían profundizar más en modelado cuantitativo de las relaciones observadas, así como examinar la replicabilidad de La metodología propuesta se ha aplicado en diversos contextos industriales, ampliando su potencial de generalización. analítico.

REFERENCIAS

BLACKSTONE, JH Teoría de las restricciones: informe de situación. Revista Internacional de Investigación de la Producción, 2001.

HOPP, W.; SPEARMAN, M. Física de fábricas. 3.^a ed. Long Grove: Waveland Press, 2011.

OHNO, T. Sistema de producción Toyota: Más allá de la producción a gran escala. Portland: Productivity Press, 1988.

SHINGO, S. Un estudio del sistema de producción de Toyota. Portland: Productivity Press, 1989.

WATSON, K.; BLACKSTONE, J.; GARDINER, S. La evolución de la teoría de las restricciones. Revista Internacional de Investigación en Producción, 2007.

WOMACK, JP; JONES, DT Pensamiento Lean: Elimine el desperdicio y cree riqueza en su empresa. Nueva York: Free Press, 2003.