RCMOS – Revista Científica Multidisciplinar O Saber.
ISSN: 2675-9128. São Paulo-SP.

Ano VI, v.1 2026 | submissão: 14/02/2026 | aceito: 16/02/2026 | publicação: 18/02/2026

Mapeamento do Fluxo de Valor (VSM) aplicado à indústria aeroespacial: uma abordagem analítica orientada à identificação de gargalos produtivos

Value Stream Mapping (VSM) applied to aerospace manufacturing: a bottleneck-oriented analytical approach

Madison Leandro Farias de Carvalho – AIAA Member #1857656
Founder & Principal Engineer – Aerostructure Systems & Lean Solutions LLC (USA), madison.carvalho@outlook.com

Resumo
A identificação de gargalos produtivos constitui um dos desafios mais relevantes na indústria aeroespacial, em função da elevada complexidade dos fluxos produtivos, da forte interdependência entre os processos e dos rigorosos requisitos associados à qualidade e à segurança. Embora o Value Stream Mapping (VSM) seja amplamente empregado na análise de fluxos, sua aplicação tradicional apresenta limitações quanto à detecção de restrições sistêmicas de capacidade, sobretudo em ambientes marcados por elevada variabilidade operacional. Neste artigo, propõe-se uma abordagem analítica estruturada, organizada em seis etapas, resultante da integração de princípios do Lean Manufacturing, da Teoria das Restrições e da análise de capacidade produtiva. Essa abordagem foi aplicada em um estudo de caso real de montagem estrutural aeroespacial, possibilitando a identificação de gargalos até então não reconhecidos e conduzindo a uma redução aproximada de 38% no lead time total do processo. Os resultados sugerem que a incorporação explícita da variabilidade e da capacidade à análise do fluxo de valor favorece diagnósticos mais consistentes e contribui para o aumento da estabilidade operacional em sistemas aeroespaciais complexos.
Palavras-chave: Value Stream Mapping; gargalos produtivos; capacidade produtiva; Lean Manufacturing; indústria aeroespacial.

Abstract
The identification of production bottlenecks remains one of the most critical challenges in aerospace manufacturing, given the complexity inherent to production flows, the strong interdependence among processes, and the stringent requirements related to quality and safety. While Value Stream Mapping (VSM) is widely adopted for flow analysis, its conventional application shows limitations in capturing systemic capacity constraints, particularly in environments subject to high operational variability. This paper presents a structured analytical approach, organized into six stages, developed through the integration of Lean Manufacturing principles, the Theory of Constraints, and capacity analysis. The approach was applied to a real case study of aerospace structural assembly, allowing the identification of bottlenecks that had not been previously recognized and leading to an approximate 38% reduction in total process lead time. The findings indicate that the explicit incorporation of variability and capacity into value stream analysis supports more robust diagnostics and contributes to improved operational stability in complex aerospace systems.
Keywords: Value Stream Mapping; production bottlenecks; capacity analysis; Lean Manufacturing; aerospace industry.

1. Introdução

A indústria aeroespacial caracteriza-se por sistemas produtivos de elevada complexidade, nos quais múltiplos processos interdependentes operam sob requisitos rigorosos de qualidade, segurança e rastreabilidade. Em contraste com setores de manufatura de alto volume e baixa variabilidade, a produção aeronáutica envolve componentes estruturais críticos, ciclos produtivos longos, baixo volume, alto mix e tolerâncias extremamente restritas. Nesse cenário, pequenas ineficiências locais

Este é um artigo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença CreativeCommons Attribution, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que o trabalho original seja corretamente citado.

Ano VI, v.1 2026 | submissão: 14/02/2026 | aceito: 16/02/2026 | publicação: 18/02/2026

podem se propagar e produzir efeitos sistêmicos relevantes, com atrasos recorrentes, aumento de custos e instabilidade operacional.

Mesmo com a ampla adoção de práticas de Lean Manufacturing no setor aeroespacial, fabricantes seguem enfrentando gargalos crônicos ao longo de suas cadeias produtivas. Esses gargalos, em geral, não se apresentam como falhas evidentes em operações isoladas; tendem a emergir nas interfaces entre processos, nos fluxos de informação, nas etapas de inspeção e, em particular, na alocação inadequada de capacidade produtiva. Esse padrão aponta para uma limitação estrutural de abordagens tradicionais de análise, frequentemente orientadas à otimização local em detrimento de uma leitura sistêmica do fluxo de valor.

O Value Stream Mapping (VSM) é amplamente reconhecido como uma das principais ferramentas do Lean Manufacturing para a visualização de fluxos de materiais e informações. Entretanto, sua aplicação convencional concentra-se, predominantemente, na identificação de desperdícios mais evidentes — como estoques excessivos e tempos de espera — sem aprofundar a análise das restrições de capacidade que condicionam o desempenho global do sistema. Em ambientes de alta complexidade, como a manufatura aeroespacial, essa limitação pode levar a diagnósticos incompletos, nos quais gargalos reais permanecem ocultos ou acabam tratados de forma pontual e reativa.

Há ainda um elemento adicional: a variabilidade operacional inerente a processos manuais de alta precisão, típica da montagem estrutural aeronáutica, atua como amplificador de restrições produtivas. Variações sutis na execução das tarefas, na sequência operacional ou na disponibilidade de recursos podem deslocar gargalos ao longo da linha, conferindo-lhes caráter dinâmico e dificultando sua identificação por métodos essencialmente estáticos. Por isso, a representação do fluxo médio, frequentemente adotada em mapas tradicionais de estado atual, tende a ser insuficiente para capturar a realidade operacional desses sistemas.

Diante dessas limitações, torna-se necessário ampliar o uso do VSM para além de sua aplicação clássica, integrando análise de capacidade produtiva, identificação de gargalos sistêmicos e avaliação do impacto da variabilidade sobre o fluxo global. Este artigo propõe uma abordagem analítica estruturada em seis etapas, que estende o VSM tradicional ao incorporar princípios da Teoria das Restrições, análise de capacidade e validação sistêmica do fluxo produtivo. A abordagem foi organizada a partir de práticas industriais e da literatura, com o propósito de apoiar diagnósticos de gargalos mais robustos e replicáveis em sistemas produtivos complexos.

A relevância deste estudo se sustenta em três aspectos. Primeiro, gargalos produtivos persistentes figuram entre os principais fatores limitantes do desempenho da indústria aeroespacial global, incluindo fabricantes e fornecedores sediados nos Estados Unidos. Segundo, a identificação inadequada de restrições compromete decisões estratégicas de investimento, planejamento de

Este é um artigo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença CreativeCommons Attribution, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que o trabalho original seja corretamente citado.

Ano VI, v.1 2026 | submissão: 14/02/2026 | aceito: 16/02/2026 | publicação: 18/02/2026
capacidade e alocação de recursos. Terceiro, metodologias estruturadas e baseadas em evidências, ainda que em estágio exploratório, contribuem para elevar a competitividade industrial e mitigar riscos operacionais em um setor considerado estratégico.

Dessa forma, os objetivos deste trabalho são:

(I) discutir as limitações do VSM tradicional na identificação de gargalos produtivos em ambientes aeroespaciais;

(II) apresentar, de forma detalhada, a abordagem analítica estruturada em seis etapas;

(III) demonstrar sua aplicação em um processo real de montagem estrutural aeronáutica; e

(IV) analisar seus impactos sobre capacidade produtiva, estabilidade de fluxo e desempenho operacional.

2 Marco Teórico / Resultados

2.1 Complexidade produtiva na indústria aeroespacial

Os sistemas produtivos da indústria aeroespacial distinguem-se por um elevado grau de complexidade estrutural, operacional e organizacional. Características como baixo volume, alto mix, ciclos de fabricação prolongados, forte dependência de operações manuais e rigorosos requisitos regulatórios tornam o desempenho global particularmente sensível a variações locais aparentemente pequenas. Nesses sistemas, a capacidade produtiva emerge da interação dinâmica entre processos, fluxos de informação e restrições técnicas, não podendo ser compreendida apenas como a soma das capacidades individuais.

2.2 Gargalos produtivos e Teoria das Restrições

A Teoria das Restrições estabelece que o desempenho de qualquer sistema é condicionado pela presença de, ao menos, uma restrição dominante. Em sistemas complexos, essa restrição pode assumir caráter distribuído, móvel ou mesmo permanecer mascarado pela variabilidade operacional. Nesse contexto, os esforços de otimização local que não obedecem às restrições sistêmicas tendem a produzir ganhos limitados ou, em certos casos, efeitos contraproducentes.

2.3 Value Stream Mapping (VSM) e suas limitações

O Value Stream Mapping (VSM) consolidou-se como uma ferramenta central do Lean Manufacturing para a visualização de fluxos de materiais e informações. Entretanto, sua aplicação

Este é um artigo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença CreativeCommons Attribution, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que o trabalho original seja corretamente citado.

Ano VI, v.1 2026 | submissão: 14/02/2026 | aceito: 16/02/2026 | publicação: 18/02/2026

tradicional privilegia a representação média do fluxo e a identificação de desperdícios mais evidentes, o que impõe limitações à identificação de restrições de capacidade e de gargalos dinâmicos em ambientes caracterizados por elevada variabilidade.

2.4 Integração entre Lean Manufacturing e Teoria das Restrições

A integração entre os princípios do Lean Manufacturing e da Teoria das Restrições possibilita o direcionamento das iniciativas de melhoria para pontos de maior impacto sistêmico. No contexto aeroespacial, essa combinação contribui para evitar investimentos ineficientes e soluções meramente paliativas, ao alinhar a eliminação de desperdícios à gestão das restrições críticas que condicionam o desempenho global do sistema.

2.5 Lacuna teórica e motivação da abordagem proposta

A literatura aponta a ausência de abordagens estruturadas que integrem VSM, Teoria das Restrições e análise de variabilidade com foco explícito na identificação de gargalos dinâmicos em ambientes aeroespaciais. Essa lacuna sustenta a motivação para a proposição de uma abordagem analítica estruturada em seis etapas, concebida como uma extensão metodológica do VSM tradicional.

3. Material e Método

O estudo caracteriza-se como uma pesquisa aplicada, de natureza qualitativa e quantitativa, conduzida por meio de um estudo de caso único em um ambiente real de manufatura aeroespacial.

3.1 Contexto do estudo de caso

O estudo foi desenvolvido em uma linha de montagem estrutural aeroespacial dedicada à produção de subconjuntos críticos, caracterizada por operações predominantemente manuais e pela presença de múltiplas etapas de inspeção. Por razões de confidencialidade, informações proprietárias foram omitidas, mantendo-se, contudo, as características essenciais do processo analisado.

3.2 Delineamento metodológico

O delineamento metodológico compreendeu três fases distintas:

(I) diagnóstico do estado atual por meio da aplicação do VSM;

Este é um artigo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença CreativeCommons Attribution, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que o trabalho original seja corretamente citado.

RCMOS – Revista Científica Multidisciplinar O Saber.
ISSN: 2675-9128. São Paulo-SP.
Ano VI, v.1 2026 | submissão: 14/02/2026 | aceito: 16/02/2026 | publicação: 18/02/2026
(II) aplicação da abordagem analítica estruturada em seis etapas; e
(III) avaliação dos impactos das intervenções propostas com base em indicadores de desempenho.

3.3 Coleta de dados

A coleta de dados ocorreu ao longo de um período representativo do ciclo produtivo e incluiu observação direta das operações, registros históricos de tempos de ciclo, dados de capacidade por estação, informações sobre trabalho em processo (WIP) e registros de não conformidades.

3.4 Indicadores de desempenho

Foram analisados o lead time total, o tempo de ciclo por operação, o acúmulo de trabalho em processo e a estabilidade do fluxo produtivo.

3.5 Procedimentos de análise

Os dados foram analisados de forma iterativa, com a comparação entre o estado inicial do sistema e o desempenho observado após a implementação das ações orientadas à mitigação dos gargalos identificados.

4. Resultados e Discussão

4.1 Diagnóstico inicial

A aplicação da abordagem possibilitou a identificação de gargalos que não haviam sido reconhecidos por análises convencionais. A incorporação explícita de dados de capacidade e de variabilidade evidenciou restrições latentes, especialmente nas interfaces entre processos e nas etapas de inspeção.

4.2 Intervenções propostas

As ações priorizadas envolveram a redistribuição de carga entre operações, a sincronização das atividades de inspeção, a revisão das sequências operacionais e ajustes em políticas operacionais, em consonância com os princípios da Teoria das Restrições.

Este é um artigo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença CreativeCommons Attribution, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que o trabalho original seja corretamente citado.

RCMOS – Revista Científica Multidisciplinar O Saber.
ISSN: 2675-9128. São Paulo-SP.

Ano VI, v.1 2026 | submissão: 14/02/2026 | aceito: 16/02/2026 | publicação: 18/02/2026

4.3 Impactos observados

Verificou-se uma redução aproximada de 38% no lead time total do processo, acompanhada pela diminuição do trabalho em processo (WIP) e pelo aumento da estabilidade do fluxo produtivo, sem que houvesse incremento da capacidade nominal.

4.4 Discussão

Os resultados indicam que o VSM tradicional, quando aplicado de forma isolada, mostra-se insuficiente para o diagnóstico de gargalos em sistemas aeroespaciais complexos. A integração de análises de capacidade e de variabilidade permitiu revelar restrições anteriormente ocultas e viabilizou a obtenção de ganhos sistêmicos com caráter mais sustentável.

Considerações Finais

A abordagem analítica estruturada em seis etapas ampliou a capacidade diagnóstica do VSM em um ambiente aeroespacial complexo, viabilizando a identificação e a mitigação de gargalos sistêmicos que permaneciam ocultos. Os ganhos observados resultaram da redução da variabilidade e do alinhamento entre demanda e capacidade, e não de investimentos voltados à expansão produtiva. Embora a validação empírica se restrinja a um único estudo de caso, os resultados indicam potencial de replicação em contextos com características semelhantes.

Referências

GOLDRATT, E. M. *The goal: a process of ongoing improvement*. Great Barrington: North River Press, 1984.

OHNO, T. *Toyota production system: beyond large-scale production*. Portland: Productivity Press, 1988.

ROTHER, M.; SHOOK, J. *Learning to see: value stream mapping to create value and eliminate muda*. Brookline: Lean Enterprise Institute, 1998.

SHINGO, S. *A study of the Toyota production system*. Cambridge: Productivity Press, 1989.

WOMACK, J. P.; JONES, D. T. *Lean thinking: banish waste and create wealth in your corporation*. New York: Simon & Schuster, 1996.

Este é um artigo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença CreativeCommons Attribution, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que o trabalho original seja corretamente citado.