57º SBPO
SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PESQUISA OPERACIONAL
Gramado • RS
DE 5 A 9 DE OUTUBRO DE 2025

ANÁLISE DE PROCESSOS PRODUTIVOS COM SIMULAÇÃO A EVENTOS DISCRETOS: UM ESTUDO DO DIMENSIONAMENTO DOS RECURSOS NECESSÁRIOS À INTERNALIZAÇÃO DE UM PROCESSO INDUSTRIAL

César Mendes[1]; Mariane Borim Lima[1]; José Antonio de Queiroz[1]; José Arnaldo Barra Montevechi[1]; Danilo Mingotte[2]; Felipe Vieira Orlando[2]

cesarmendes@unifei.edu.br; ma.borim.lima@unifei.edu.br; ja.queiroz@unifei.edu.br; montevechi@unifei.edu.br; danilo.mingotte@gmail.com; felipe.orlando@joysonsafety.com

[1]Universidade Federal de Itajubá
Av. BPS, 1303, Pinheirinho, Itajubá – MG

[2]Joyson Safety Systems
Rodovia Dom Gabriel P. Bueno Couto, Medeiros, Jundiaí – SP

RESUMO

Este artigo apresenta um estudo baseado na Simulação a Eventos Discretos (SED), com foco na análise e reconfiguração de uma linha produtiva no setor automotivo. O objetivo foi dimensionar os recursos necessários para internalizar um processo de revestimento anteriormente terceirizado. Utilizando o *framework* de [Montevechi *et al*. 2010], foi construído um modelo computacional validado com dados reais e replicações estatísticas. A simulação de diferentes cenários operacionais permitiu comparar indicadores como produtividade, *lead time* e taxa de agregação de valor (TAV). Dentre os cinco cenários simulados, a configuração com quatro linhas internas apresentou os melhores resultados, com aumento de 20,49% na produção, redução de 33,17% no *lead time* e elevação de 60% na TAV. Conclui-se que a SED é uma ferramenta eficaz para apoiar decisões estratégicas em contextos industriais, contribuindo para maior controle, eficiência e desempenho da cadeia produtiva.

PALAVRAS CHAVE. Simulação a Eventos Discretos (SED), Redução de *Lead Time*, Aumento de Produtividade
SIM - Simulação

ABSTRACT

This paper presents a study based on Discrete Event Simulation (DES), focused on analyzing and reconfiguring a production line in the automotive sector. The objective was to determine the required resources for internalizing a coating process that was previously outsourced. Using the framework proposed by [Montevechi et al. 2010], a statistically validated simulation model was developed with real production data. Several operational scenarios were simulated and compared based on key performance indicators such as productivity, lead time, and value-added rate (VAR). Among the five tested scenarios, the configuration with four internal coating lines delivered the best results: a 20.49% increase in total production, a 33.17% reduction in lead time, and a 60% improvement in VAR. The findings confirm that DES is an effective tool to support strategic decisions in industrial settings, offering enhanced operational control, efficiency, and supply chain performance.

KEYWORDS. Discrete Event Simulation (DES), Lead Time Reduction, Productivity Increase
SIM - Simulation

DOI: 10.59254/sbpo-2025-212214
https://proceedings.science/p/212214?lang=pt-br

1. Introdução

A terceirização de etapas produtivas é uma prática comum em empresas que buscam reduzir custos ou acessar competências especializadas. No entanto, essa estratégia pode introduzir riscos operacionais, como perda de controle sobre os processos, falhas na comunicação e comprometimento da qualidade. No setor automotivo, tais impactos tendem a se amplificar, dada a complexidade das cadeias produtivas e a exigência por altos níveis de eficiência. Quando os efeitos da terceirização se tornam negativos e insustentáveis, muitas organizações optam por internalizar processos, o que exige um planejamento criterioso para evitar desperdícios de tempo e recursos.

Neste contexto, a Simulação a Eventos Discretos (SED) apresenta-se como uma ferramenta eficaz para apoiar decisões estratégicas relacionadas à reconfiguração de processos produtivos. Por meio da modelagem de sistemas em ambiente virtual, a SED permite a experimentação de cenários alternativos sem interferência no ambiente real, possibilitando a análise de gargalos, avaliação de recursos e antecipação de problemas. Segundo [Montevechi *et al*. 2007], a simulação representa a transposição da realidade para um ambiente controlado, onde é possível testar hipóteses e analisar comportamentos sistêmicos sob diferentes condições.

Este artigo relata a aplicação do *software* FlexSim na modelagem de uma linha produtiva de uma empresa do setor automobilístico, diante da necessidade de internalização de um processo terceirizado de revestimento. O objetivo é simular diferentes cenários operacionais para subsidiar o dimensionamento adequado dos recursos necessários à nova configuração do processo produtivo. Os procedimentos metodológicos que orientam esta pesquisa, envolvem a construção e validação de um modelo computacional representativo do sistema atual, seguidas da experimentação de alternativas que substituem a terceirização pela internalização do processo de revestimento. O estudo contribui com uma abordagem prática de aplicação da SED na indústria, oferecendo suporte à tomada de decisão em contextos de alteração estrutural da cadeia produtiva. Por razões de confidencialidade, o nome da empresa e detalhes específicos de seus produtos e processos foram mantidos de forma genérica.

2. Referencial teórico

2.1 Simulação

A simulação é uma técnica utilizada para representar virtualmente sistemas reais, com o objetivo de analisar seu comportamento ao longo do tempo. De acordo com [Banks, 1998], simular consiste em criar modelos que reproduzem as principais características de um sistema real, permitindo inferências sobre seu desempenho em diferentes cenários. Essa abordagem possibilita testar alternativas, antecipar problemas e apoiar decisões sem a necessidade de interferência direta no ambiente real.

Com o avanço da tecnologia, a simulação evoluiu para o ambiente computacional, tornando-se uma ferramenta fundamental na análise de sistemas complexos e dinâmicos [Nance e Sargent, 2002]. Atualmente, sua aplicação é consolidada em diversas áreas da indústria, especialmente no apoio à tomada de decisão em processos produtivos [Rodič, 2017], [Mourtzis, 2020], [Scheidegger *et al*. 2018] e [Santos *et al*. 2021].

Entre as principais abordagens de simulação, destacam-se: Simulação de Monte Carlo, Simulação Contínua, Simulação Baseada em Agentes (SBA), Simulação a Eventos Discretos (SED) e Simulação Híbrida, que combina elementos de SBA e SED. Este trabalho tem como foco a SED, devido à sua adequação à modelagem de processos produtivos com fluxo de entidades e eventos ao longo do tempo.

2.2 Simulação a Eventos Discretos (SED)

A SED tem se consolidado como uma ferramenta central na Pesquisa Operacional, impulsionada pelo avanço da capacidade computacional [Siebers *et al*. 2010]. Essa abordagem permite representar a dinâmica de sistemas complexos ao modelar alterações de estado provocadas

DOI: 10.59254/sbpo-2025-212214
https://proceedings.science/p/212214?lang=pt-br

por eventos que ocorrem em instantes discretos de tempo [Nance e Sargent, 2002], [Law, 2014] e [Chwif e Medina, 2015].

A SED é amplamente utilizada na modelagem de sistemas produtivos, logísticos e de tráfego, devido à sua capacidade de capturar a variabilidade, as interações entre recursos e os fluxos operacionais de forma precisa. Sua aplicação permite a experimentação em ambiente virtual, apoiando decisões estratégicas e operacionais por meio da análise de diferentes cenários, sem a necessidade de intervenções no sistema real [Saidani, Kim e Kim, 2021] Essa característica contribui diretamente para a redução de riscos, custos e desperdícios associados a mudanças físicas prematuras.

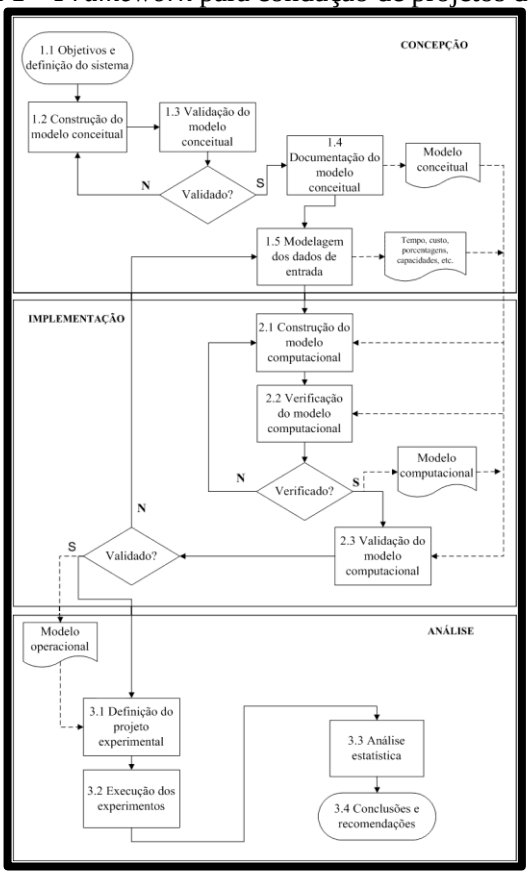
Outro diferencial da SED está em sua representação visual e gráfica, que favorece a compreensão de processos complexos. Essa visualização facilita a comunicação entre os envolvidos no projeto, especialmente quando há necessidade de participação ativa de *stakeholders* no processo de melhoria [Robinson *et al*. 2014].

Para que os projetos de simulação produzam resultados confiáveis e aplicáveis, é essencial seguir um método estruturado, com etapas bem definidas desde a concepção do modelo até a análise dos resultados [Law, 2009]. A adoção de boas práticas na condução desses projetos contribui para a validade do modelo e para a geração de soluções consistentes para os sistemas estudados.

3. Procedimentos metodológicos

O método de pesquisa utilizado neste trabalho é o de Modelagem e Simulação, conduzido por meio do *framework* proposto por [Montevechi *et al*. 2010] e apresentado na Figura 1.

Figura 1 – *Framework* para condução de projetos de SED



Fonte: [Montevechi *et al*. 2010]

DOI: 10.59254/sbpo-2025-212214
https://proceedings.science/p/212214?lang=pt-br

O *framework* é dividido em três grandes fases: concepção, implementação e análise. Cada fase contempla um conjunto de atividades que orientam a construção, verificação e validação do modelo de simulação, bem como a análise dos resultados.

A fase de Concepção envolve a definição do problema a ser estudado e o entendimento do sistema real. Inicialmente, define-se o objetivo do projeto e as especificações do sistema, incluindo os elementos-chave e suas interações. Em seguida, é construído um modelo conceitual, que representa o sistema de forma gráfica, matemática ou lógica, detalhando os fluxos, recursos, entradas e saídas. Este modelo é validado por especialistas para garantir sua aderência à realidade e, uma vez validado, é devidamente documentado. Por fim, são coletados e tratados os dados de entrada do sistema, utilizando métodos estatísticos que permitam ajustá-los a distribuições de probabilidade adequadas para alimentar o modelo computacional.

Na fase de Implementação, o modelo conceitual é traduzido para um ambiente computacional utilizando um *software* de SED. A construção do modelo computacional é realizada de forma iterativa, com verificações contínuas da lógica implementada. A verificação assegura que o modelo foi corretamente desenvolvido conforme o planejado. Após essa etapa, realiza-se a validação do modelo computacional, que consiste em comparar os resultados gerados pela simulação com os comportamentos esperados do sistema real, por meio de análises estatísticas e validação junto a especialistas.

Após a validação do modelo computacional, passa-se à fase de Análise, na qual são definidos os experimentos a serem realizados. Esta etapa inclui a criação de cenários alternativos, visando avaliar o impacto de diferentes configurações ou propostas de melhoria no sistema. Os experimentos são executados de forma controlada e repetida, permitindo a coleta de dados confiáveis. Os resultados obtidos são submetidos à análise estatística, com o objetivo de embasar conclusões e recomendações que possam orientar decisões no contexto estudado.

4. Aplicação e análise dos resultados

O desenvolvimento deste estudo foi realizado em uma filial de uma organização multinacional especializada na manufatura de componentes automotivos, situada em uma cidade no estado de São Paulo. A empresa é reconhecida pela sua experiência no setor automobilístico, fornecendo peças de alta qualidade para diversas montadoras, e está inserida em um mercado altamente competitivo, o que a torna propensa a buscar constantemente soluções inovadoras para otimizar seus processos produtivos.

A unidade de produção em questão fabrica quatro famílias distintas de produtos, abrangendo uma ampla gama de componentes automotivos. Essas famílias são subdivididas em subfamílias de produtos. Cada subfamília possui características específicas que influenciam diretamente os processos produtivos, demandando uma gestão precisa para garantir a eficiência e a qualidade do produto final.

4.1 Concepção

A primeira fase do *framework* proposto por [Montevechi *et al*. 2010] compreende a etapa de Concepção, a qual é subdividida em cinco etapas.

A primeira etapa teve início pela Definição de Objetivos e do Sistema, cujo propósito estabelecido foi o desenvolvimento de um modelo de simulação que permitisse mensurar indicadores como tempo de *lead time*, taxa de agregação de valor (TAV) e produtividade do processo. Adicionalmente, o modelo deveria possibilitar a análise de cenários hipotéticos com foco no dimensionamento dos recursos necessários para internalização do processo de revestimento, atualmente terceirizado. Dando sequência à essa etapa, foi realizada a Delimitação do Sistema, que incluiu a representação de uma linha produtiva de uma subfamília de produtos, abrangendo os setores de Fundição, Lavagem, Injeção, Revestimento (terceirizado) e Montagem. Com o intuito de garantir a clareza na modelagem, foi explicitado o escopo do modelo computacional quanto ao nível de detalhamento adotado. Os processos de Fundição, Lavagem, Injeção e Montagem (Linha 1) foram modelados em detalhe, enquanto o abastecimento de componentes, revestimento externo,

DOI: 10.59254/sbpo-2025-212214
https://proceedings.science/p/212214?lang=pt-br

Montagem Auxiliar (Linha 2, complementar à Linha 1) e Expedição foram representados de forma simplificada, por não serem considerados pontos críticos para a empresa.

A etapa de Construção do Modelo Conceitual foi baseada na técnica de mapeamento de processos IDEF-SIM, proposta por [Leal, Almeida e Montevechi, 2008], recomendada por seu alto nível de detalhamento em projetos de SED. Para obtenção das informações necessárias, foi conduzido um *Gemba Walk* nos setores produtivos, complementado pela análise de folhas de métodos disponibilizadas pela empresa. Esse mapeamento permitiu a visualização sistêmica da cadeia produtiva da subfamília em estudo.

A etapa de Validação do Modelo Conceitual foi realizada por meio da revisão do fluxograma lógico por especialistas da empresa, os quais confirmaram sua aderência à realidade observada no sistema produtivo.

A etapa de Documentação do Modelo Conceitual foi consolidada em um relatório técnico, complementado por um repositório digital contendo todos os arquivos e registros obtidos ao longo da condução do projeto, a fim de garantir a rastreabilidade e o suporte às etapas subsequentes da modelagem.

Por fim, a quinta e última etapa, de Modelagem dos Dados de Entrada, iniciou-se com a coleta de dados relativos aos tempos de processo e paradas de produção. Devido à ausência de dados históricos confiáveis para os tempos de processos, foi necessária a realização de cronoanálises. As atividades foram previamente identificadas por meio de códigos denominados ID's, que indicavam o setor, local e descrição do processo, facilitando a coleta de dados. As medições foram realizadas a partir de vídeos gravados estrategicamente nas estações de trabalho, posteriormente analisados com o auxílio do *software* de edição de vídeo Filmora, o que permitiu a extração precisa dos tempos de ciclo. A quantidade mínima de amostras foi estimada com base na Equação 1, sendo limitada a um máximo de 25 coletas por processo, devido às restrições de acesso à empresa e dos recursos disponíveis.

$$\left(\frac{1{,}96 * Desvio\ Padrão}{0{,}05 * Média}\right)^2 \qquad \text{Equação (1)}$$

Os dados coletados foram então transformados em distribuições de probabilidade com auxílio da ferramenta ExpertFit, integrada ao *software* de simulação FlexSim. As distribuições geradas foram organizadas em uma planilha denominada "*Dashboard"*, utilizada para alimentar o modelo computacional. Além dos tempos de processo, foram modeladas distribuições para as paradas não programadas com base em dados históricos fornecidos pela empresa. A partir desses dados, foram criadas curvas para o tempo médio entre falhas (*Mean Time Between Failure - MTBF*) e tempo médio de reparo (*Mean Time To Repair - MTTR*), após o devido tratamento estatístico e exclusão de *outliers*.

Com a modelagem estatística concluída, encerrou-se a fase de Concepção, proporcionando uma base estruturada para o desenvolvimento da fase de Implementação.

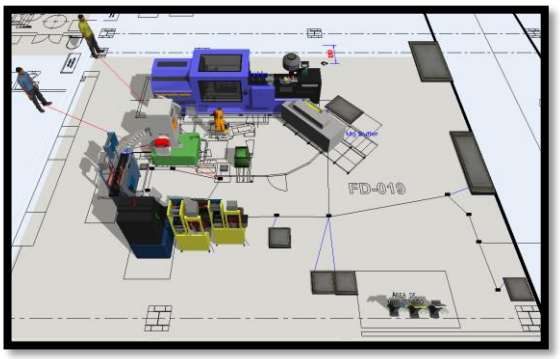
4.2 Implementação

A fase de Implementação compreende a transição do modelo conceitual para sua representação computacional, estruturando a simulação no ambiente virtual. Esta fase está dividida em três etapas principais: Construção, Verificação e Validação do Modelo Computacional.

Inicialmente, foi realizada a Construção do Modelo Computacional no *software* FlexSim, com base nas definições do modelo conceitual previamente elaborado. Os setores de Fundição, Lavagem, Injeção e Montagem foram modelados com detalhamento das lógicas de fluxo e da alocação de operadores, conforme apresentados nas Figuras 2, 3, 4 e 5, enquanto o setor de Revestimento Externo foi representado de forma simplificada, com parametrização da taxa de processamento. A modelagem computacional permitiu a visualização dinâmica do sistema produtivo, facilitando a análise e comunicação dos resultados.

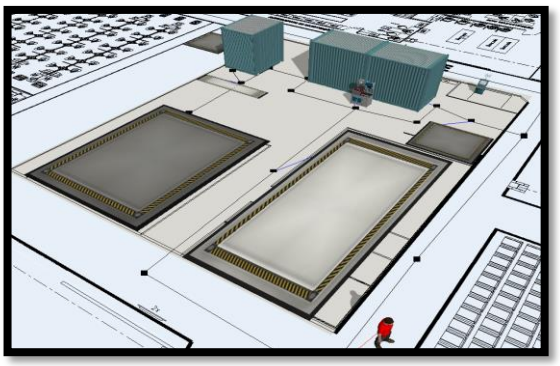
DOI: 10.59254/sbpo-2025-212214
https://proceedings.science/p/212214?lang=pt-br

Figura 2 – Modelo computacional da Fundição



Fonte: autores

Figura 3 – Modelo computacional da Lavagem



Fonte: autores

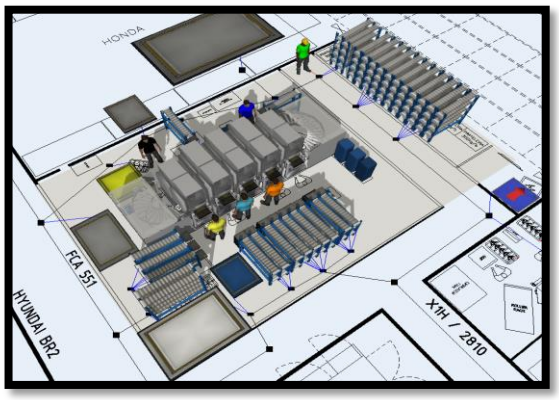
Figura 4 – Modelo computacional da Injeção



Fonte: autores

DOI: 10.59254/sbpo-2025-212214
https://proceedings.science/p/212214?lang=pt-br

Figura 5 – Modelo computacional da Montagem (linha 1)



Fonte: autores

A seguir, procedeu-se à Verificação do Modelo Computacional, com o objetivo de assegurar a coerência lógica da estrutura implementada. Foram utilizados dados de entrada aleatórios inseridos na planilha "*Dashboard*" para avaliar o comportamento do modelo e verificar eventuais inconsistências. Essa verificação foi complementada com a participação de colaboradores especialistas da empresa, que auxiliaram na validação da lógica do sistema modelado.

A última etapa desta fase consistiu na Validação do Modelo Computacional. Visando atestar a fidelidade da simulação em relação ao sistema real, adotou-se a validação estatística por meio da comparação entre os *outputs* gerados pelo modelo e os dados reais históricos da empresa. As simulações foram executadas com dados reais de ordens de produção. A validação foi realizada de forma segregada por setor, permitindo identificar a aderência do modelo a cada etapa da cadeia produtiva. Essa abordagem reforçou a confiabilidade local do modelo e facilitou ajustes pontuais sempre que necessário.

4.2.1 Validação do setor de Fundição

O primeiro setor submetido ao processo de validação foi o de Fundição. Para tanto, selecionou-se um período de *benchmark* de duas semanas em que a produção real registrada pela empresa foi de 7.993 unidades. Esse intervalo foi replicado no ambiente virtual do FlexSim, com a mesma duração e condições operacionais, visando comparar os resultados da simulação com os dados reais observados.

Utilizou-se a ferramenta Experimenter, disponível no próprio *software* de simulação, para conduzir 32 replicações do modelo, possibilitando a análise da consistência e variabilidade dos *outputs* do sistema. Os resultados obtidos — valores mínimo e máximo de produção, intervalo de confiança e desvio padrão amostral — são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Resultado das replicações no setor de Fundição

Média (IC: 95%)	**Mínimo**	**Máximo**	**Desv. Pad. Amostral**
8.004 ± 78,7	7.407	8.288	218,1

Fonte: autores

A média de produção obtida nas simulações foi de 8.004 unidades, variando entre 7.925,3 e 8.082,7 unidades para um intervalo de confiança de 95%. O desvio padrão amostral calculado foi de 218,1 unidades, e os valores mínimo e máximo observados foram de 7.407 e 8.288 unidades, respectivamente.

A acurácia do modelo foi avaliada por meio da margem de erro percentual, conforme a Equação 2, proposta por [Nedra *et al*. 2021].

DOI: 10.59254/sbpo-2025-212214
https://proceedings.science/p/212214?lang=pt-br

$$Erro\ (\%) = \frac{Modelo - Real}{Real} \qquad \text{Equação (2)}$$

Com base na aplicação dessa equação, obteve-se uma margem de erro de 0,14%, indicando uma forte aderência do modelo aos dados reais da empresa. Dessa forma, conclui-se que o modelo computacional desenvolvido para o setor de Fundição é estatisticamente válido e representa adequadamente o comportamento do sistema produtivo real.

4.2.2 Validação do setor de Injeção

Após a validação do setor de Fundição, o processo foi estendido ao setor de Injeção. Para essa etapa, foi selecionado um período de *benchmark* correspondente a 30 dias, no qual a produção real registrada foi de 10.895 unidades. Esse intervalo de tempo foi replicado no modelo computacional com o objetivo de representar com fidelidade o comportamento observado no ambiente fabril.

Com os dados de entrada ajustados ao período de referência, foram realizadas 25 replicações no ambiente de simulação por meio da ferramenta Experimenter, a fim de mensurar a variabilidade dos resultados gerados. Os *outputs* obtidos em cada execução estão consolidados na Tabela 2.

Tabela 2 – Resultado das replicações no setor de Injeção

Média (IC: 95%)	Mínimo	Máximo	Desv. Pad. Amostral
10.893,6 ± 25,3	10.753	10.985	61,2

Fonte: autores

A análise das replicações com um intervalo de confiança de 95% revelou uma média de produção de 10.893,6 unidades, com limites inferior e superior de 10.868,3 e 10.918,9 unidades, respectivamente. O desvio padrão amostral foi de 61,2 unidades, com valores extremos de produção de 10.753 e 10.985 unidades, respectivamente.

A acurácia do modelo foi novamente avaliada por meio do cálculo da margem de erro percentual, conforme estabelecido pela Equação 2, já apresentada.

Com a aplicação dessa equação, obteve-se uma margem de erro de 0,13%, valor que evidencia a aderência do modelo às condições reais observadas. Diante desses resultados, conclui-se que o modelo do setor de Injeção é estatisticamente validado e representa com fidelidade o sistema produtivo modelado.

4.2.3 Validação do setor de Montagem

A última etapa de validação estatística foi realizada no setor de Montagem, com foco específico na Linha 1, a qual foi modelada com maior nível de detalhamento. Para esse processo, foi selecionado um período de três semanas como *benchmark*, durante o qual foram registradas 5.349 unidades produzidas. Esse intervalo de tempo foi replicado no ambiente de simulação com o intuito de refletir o desempenho real do sistema produtivo.

Com os dados de entrada correspondentes ao *benchmark* definido, foram realizadas 20 replicações no modelo computacional. Os resultados dessas simulações são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 – Resultado das replicações no setor de Montagem (linha 1)

Média (IC: 95%)	Mínimo	Máximo	Desv. Pad. Amostral
5443,4 ± 71,9	5.099	5.709	153,7

Fonte: autores

A análise dos *outputs* com intervalo de confiança de 95% indicou uma média de produção de 5.443,4 unidades, com limites inferior e superior de 5.371,5 e 5.515,3 unidades,

DOI: 10.59254/sbpo-2025-212214
https://proceedings.science/p/212214?lang=pt-br

respectivamente. O desvio padrão amostral registrado foi de 153,7 unidades, com valores extremos de produção de 5.099 e 5.709 unidades, respectivamente.

A margem de erro percentual foi utilizada como critério para validar o modelo, conforme estabelecido pela Equação 2, previamente apresentada.

A partir da aplicação do cálculo, obteve-se uma margem de erro de 1,76%. Apesar de superior às demais etapas validadas, esse valor ainda é considerado aceitável pela necessidade da empresa, permitindo a confirmação da fidelidade do modelo da Linha 1 de Montagem frente ao sistema real.

Com a validação estatística dos setores de Fundição, Injeção e Montagem (Linha 1), conclui-se que a união desses modelos representa de forma fidedigna a cadeia produtiva principal do objeto de estudo. Além desses processos modelados com detalhamento e submetidos à validação, o modelo computacional também incorpora processos complementares — como inspeções em linha, recebimento e envio de componentes e movimentações no almoxarifado — que, embora não validados estatisticamente, por não serem considerados como pontos críticos do processo, foram incluídos para garantir que o fluxo produtivo estivesse completo.

A integração entre os modelos validados e os processos complementares resultou na construção do modelo computacional completo, denominado modelo *baseline*, o qual serve como referência para a análise de cenários e tomada de decisão nas etapas subsequentes do estudo.

4.3 Análise

A fase final do *framework* contempla a execução da análise dos cenários propostos, estruturada em quatro etapas. A primeira etapa consistiu na Definição do Projeto Experimental, cujo foco principal foi o processo de Revestimento, terceirizado por uma empresa parceira. Problemas relacionados à alta taxa de refugo — estimada em aproximadamente 7,6%, superando o limite acordado de 2,5% — motivaram o estudo da viabilidade de internalização deste processo, visando maior controle e eficiência produtiva.

Dessa forma, os cenários do projeto experimental foram estruturados considerando a internalização do processo de Revestimento, com o objetivo de substituir a terceirização sem comprometer a capacidade produtiva. Utilizou-se o modelo computacional desenvolvido para dimensionar diferentes configurações de linhas internas capazes de absorver a demanda anteriormente suprida pela empresa terceirizada.

A segunda etapa da fase de análise consistiu na Realização dos Experimentos. Para fins comparativos, foi primeiramente executado o cenário *baseline*, representando a situação atual com o processo terceirizado. Esse cenário foi parametrizado com dados reais fornecidos pelo setor de Planejamento e Controle da Produção (PCP), incluindo: *lead time* de dois dias, recebimento de peças entre 23h e 24h, expedição entre 05h e 06h, e taxa de reprovação de 7,6%.

A partir desse cenário de referência, foram simuladas hipóteses alternativas com a internalização do processo de Revestimento. Foram testadas configurações com uma, duas, três, quatro e cinco linhas produtivas, com o objetivo de analisar o impacto sobre a capacidade de atendimento à demanda. Para esses cenários, foram consideradas premissas operacionais de 11 peças/hora por linha e funcionamento em dois turnos, com base em dados de processos em teste da empresa.

A partir da realização dos experimentos, executados por meio da ferramenta Experimenter do FlexSim, foram obtidos diversos indicadores de desempenho, sendo as produções por setor e total os principais critérios de análise. Adicionalmente, indicadores como *lead time* e Taxa de Agregação de Valor (TAV) também foram considerados na avaliação dos cenários.

Para o cenário *baseline*, os resultados de produção obtidos são apresentados na Tabela 4.

DOI: 10.59254/sbpo-2025-212214
https://proceedings.science/p/212214?lang=pt-br

Tabela 4 – Produção simulada *baseline*

Área	**Produção**
Fundição	14.285
Injeção	11.568
Montagem linha 1	8.121
Montagem linha 2	1.638
Produção final	9.759

Fonte: autores

Com relação aos cenários propostos para a internalização do processo de revestimento, os resultados de produção para cada configuração de número de linhas produtivas estão sintetizados na Tabela 5.

Tabela 5 – Produção simulada

Área	**1 linha**	**2 linhas**	**3 linhas**	**4 linhas**	**5 linhas**
Fundição	14.000	14.084	14.241	14.176	14.337
Injeção	11.526	11.523	11.517	11.520	11.558
Montagem linha 1	4.351	6.232	8.524	9.549	9.707
Montagem linha 2	501	1.615	1.921	2.186	2.068
Produção Final	4.852	7.847	10.445	11.735	11.775

Fonte: autores

A análise dos dados evidenciou um crescimento significativo da produção ao se evoluir de uma para quatro linhas de revestimento. Contudo, a adição de uma quinta linha resultou em um ganho marginal, indicando uma possível saturação do sistema. Assim, do ponto de vista produtivo, a implementação de cinco linhas pode ser considerada inviável frente ao custo incremental, dado o baixo retorno em termos de aumento de produção.

Para confirmar os benefícios da internalização, foi realizada uma comparação direta entre o cenário *baseline* e o cenário com quatro linhas internas. Observou-se uma redução do *lead time* de 9,92 dias para 6,63 dias, representando um ganho relevante em agilidade no fluxo produtivo.

Além disso, foi identificado um aumento na TAV, que passou de 0,15% no cenário *baseline* para 0,24% no cenário com quatro linhas. Esse resultado reforça a eficiência da proposta, indicando maior proporção de tempo produtivo efetivamente agregando valor ao produto final.

Diante dos indicadores analisados, o cenário com quatro linhas internas de revestimento apresenta-se como a melhor alternativa, equilibrando ganhos de produtividade, eficiência e redução de *lead time*.

Após a realização das simulações e da comparação entre os cenários que contemplaram a implementação de uma a cinco linhas internas para o processo de Revestimento, o cenário com quatro linhas produtivas destacou-se como a melhor alternativa.

Esse cenário apresentou desempenho superior em termos de produtividade, além de proporcionar redução significativa no *lead time* e aumento da TAV, quando comparado ao cenário *baseline*. Os ganhos percentuais obtidos com essa configuração estão sintetizados na Tabela 6.

Tabela 6 – Comparação de cenários baseado em ganhos percentuais

Cenários	**Produção Total**	***Lead time***	**TAV (%)**
Baseline	9.759	9,92	0,15
4 linhas	11.759	6,63	0,24
Imapcto	20,49%	-33,17%	60,00%

Fonte: autores

DOI: 10.59254/sbpo-2025-212214
https://proceedings.science/p/212214?lang=pt-br

Diante do impacto positivo observado na cadeia produtiva da subfamília de produtos analisada, recomenda-se a internalização do processo de revestimento com a implementação de quatro linhas produtivas, operando em dois turnos e com uma produtividade estimada de 11 peças por hora.

Essa configuração permite atender integralmente à demanda anteriormente atribuída à empresa terceirizada, possibilitando sua exclusão do processo produtivo. Com isso, a organização poderá reduzir perdas associadas à terceirização, aumentar o controle operacional e melhorar os indicadores de desempenho da linha produtiva.

5. Conclusões e propostas para trabalhos futuros

A SED demonstrou ser uma ferramenta poderosa na análise, tomada de decisão e otimização de sistemas produtivos complexos. Neste estudo, a aplicação da SED viabilizou o mapeamento e a avaliação de diferentes cenários relacionados à internalização de um processo anteriormente terceirizado — o Revestimento —, considerado crítico para a cadeia produtiva da subfamília de produtos em análise.

A utilização do *framework* proposto por [Montevechi *et al*. 2010] foi essencial para estruturar o desenvolvimento do projeto de simulação de forma sistemática e rigorosa. A divisão em fases permitiu a construção de um modelo computacional robusto, validado estatisticamente e capaz de refletir com fidelidade as particularidades operacionais do sistema real. A integração de dados qualitativos — por meio da voz do cliente — e quantitativos fortaleceu a aderência do modelo às condições práticas, garantindo maior confiabilidade nos resultados obtidos.

Dentre os cinco cenários propostos, o que prevê a implementação de quatro linhas internas de produção para o processo de revestimento demonstrou-se o mais viável e vantajoso. Essa configuração é capaz de suprir totalmente a demanda atendida pela empresa terceirizada, operando em dois turnos com produtividade estimada em 11 peças por hora. Em relação ao modelo *baseline*, os resultados indicaram um aumento de 20,49% na capacidade produtiva, redução de 33,17% no *lead time* (de 9,92 para 6,63 dias) e crescimento da TAV de 0,15% para 0,24%, representando ganhos operacionais e estratégicos expressivos.

Esses resultados evidenciam o potencial da SED como uma ferramenta decisiva na proposição de melhorias em sistemas produtivos. A internalização do processo de Revestimento, além de eliminar a dependência de um fornecedor externo, oferece maior controle operacional, previsibilidade e eficiência, contribuindo diretamente para o desempenho global da cadeia de suprimentos.

Por fim, recomenda-se que a empresa expanda o escopo do projeto para outras subfamílias de produtos, com o objetivo de construir um modelo integrado de simulação capaz de representar toda a planta produtiva. Tal iniciativa permitirá análises ainda mais abrangentes, proporcionando embasamento técnico-científico sólido para decisões futuras de investimentos, balanceamento de linha e otimização contínua dos processos industriais.

6. Agradecimentos

Os autores agradecem à Pró-reitoria de Pesquisa e Pós-graduação (PRPPG-UNIFEI), à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) pelo apoio financeiro e institucional concedido para a realização desta pesquisa.

Referências

Banks, J. Handbook of simulation: Principles, Methodology, Advances, Applications and Practice. John Wiley & Sons, New York, (1998).

DOI: 10.59254/sbpo-2025-212214
https://proceedings.science/p/212214?lang=pt-br

Chwif, L.; Medina, A. C. Modelagem e Simulação de Eventos Discretos. 4. ed. São Paulo: Elsevier, (2015).

Law, A. M. How to build valid and credible simulation models. In: *Winter Simulation Conference*. Proceedings... Austin, TX: (2009).

Law, A. M. Simulation Modeling and Analysis. 5. ed. Boston: McGraw-Hill Science, (2014).

Leal, F.; Almeida, D. A. de; Montevechi, J. A. B. Uma Proposta de Técnica de Modelagem Conceitual para a Simulação através de elementos do IDEF. In: *Anais do XL Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional*, João Pessoa, PB, (2008).

Montevechi, J. A. B.; Pinho A. F.; Leal, F.; Marins, F. A. S. (2007), Application of design of experiments on the simulation of a process in an automotive industry. In: *Winter Simulation Conference*. Proceedings. Washington, DC, USA.

Montevechi, J. A. B.; Leal, F.; Pinho, A. F.; Costa, R. F.; Oliveira, M. L. O.; Silva, A. L. F. Conceptual modeling in simulation projects by mean adapted IDEF: An application in a Brazilian tech company. In: *Winter Simulation Conference*. Proceedings. Baltimore, MD: (2010).

Mourtzis, D. Simulation in the Design and Operation of Manufacturing Systems: State of the Art and New Trends. International Journal of Production Research 58 (7): 1927–1949, (2020).

Nanca, R. E.; Sargent, R. G. Perspectives on the Evolution of Simulation. Operations Research, v. 50, p. 161–172, (2002).

Nedra, A.; Néjib, S.; Boubaker, J.; Morched, C. An Integrated Lean Six Sigma Approach to Modeling and Simulation: A Case Study from Clothing SME. Autex Research Journal, p. 1–7, (2021).

Robinson, S.; Worthington, C.; Burgess, N.; Radnor, Z. J. Facilitated modelling with discrete-event simulation: Reality or myth? European Journal of Operational Research, v. 234, p. 231–240, (2014).

Rodič, B. Industry 4.0 and the New Simulation Modelling Paradigm. Organizacija, v. 50, p. 193–207, (2017).

Saidani, M.; Kim, H.; Kim, J. Designing optimal COVID-19 testing stations locally: A discrete event simulation model applied on a university campus. PLoS ONE, v. 16, n. 6 June, p. 1–16, (2021).

Santos, C. H. dos; Montevechi, J. A. B.; De Queiroz, J. A.; Miranda, R. C.; Leal, F. Decision support in productive processes through DES and ABS in the Digital Twin era: a systematic literature review. International Journal of Production Research, (2021).

Scheidegger, A. P. G.; Pereira, T. F.; De Oliveira, M. L. M.; Banerjee, A.; Montevechi, J. A. B. An introductory guide for hybrid simulation modelers on the primary simulation methods in industrial engineering identified through a systematic review of the literature. Computers & Industrial Engineering, 124, 474-492, (2018).

Siebers, P. O.; Macal, C. M.; Garnett, J.; Buxton, D; Pidd, M. Discrete-event simulation is dead, long live agent-based simulation! Journal of Simulation, v. 4, n. 2, p. 204- 210, (2010).

DOI: 10.59254/sbpo-2025-212214
https://proceedings.science/p/212214?lang=pt-br