XXXIII Congresso Brasileiro de Custos
17, 18 e 19 de novembro de 2026
- Porto de Galinhas / PE -

Análise de viabilidade econômica da manufatura aditiva em moldes de injeção para peças automotivas de baixo volume sob abordagens determinística e estocástica

Alexandre Larsen (UTFPR) - alexandre.larsen12@gmail.com

José Donizetti de Lima (UTFPR) - donizetti@utfpr.edu.br

Roberto Zanetti Freire (UTFPR) - robertofreire@utfpr.edu.br

Resumo:

A indústria automobilística enfrenta pressões contínuas por flexibilidade produtiva, redução de custos e maior disponibilidade de peças de reposição, especialmente para componentes plásticos de baixo volume, comuns em veículos fora de linha ou séries especiais. Nesse contexto, este artigo analisa a viabilidade econômica da substituição de cavidades metálicas por cavidades poliméricas fabricadas por Manufatura Aditiva (MA), aplicadas à produção de peças de reposição automotivas. A pesquisa é aplicada, descritiva, quantitativa e baseada em estudo de caso, comparando dois projetos mutuamente excludentes: Projeto A, com cavidade metálica convencional fabricada por Controle Numérico Computacional (CNC), e o Projeto B, com cavidade polimérica impressa em 3D. A avaliação foi conduzida via Metodologia Multi-índice Ampliada (MMIA), abrangendo indicadores de retorno, riscos e sensibilidades, e complementada pela Simulação de Monte Carlo (SMC), mensurando o comportamento sob incerteza. Os resultados determinísticos evidenciaram maior atratividade financeira do Projeto B, pois apresenta maior grau de retorno e menores níveis de riscos e sensibilidades. Na abordagem estocástica, o Projeto B também apresentou desempenho superior, com maior expectativa de retorno e menor risco associado. Conclui-se que a MA aplicada ao Rapid Tooling constitui uma alternativa economicamente viável para baixos volumes, contribuindo para reduzir a despesa de capital, o capital imobilizado e os riscos de obsolescência dos estoques. Como contribuição, o estudo integra MA, engenharia econômica e análise de riscos, oferecendo indicadores para decisões industriais sobre ferramentais de baixo volume e reforçando o potencial do Rapid Tooling em contextos de baixa escala produtiva e de produção sob demanda.

Palavras-chave: *Manufatura aditiva, Rapid Tooling, Análise de Viabilidade Econômica, Metodologia Multi-índice Ampliada (MMIA), Simulação de Monte Carlo (SMC)*

Área temática: *Custos como ferramenta para o planejamento, controle e apoio a decisões*

Análise de viabilidade econômica da manufatura aditiva em moldes de injeção para peças automotivas de baixo volume sob abordagens determinística e estocástica

RESUMO

A indústria automobilística enfrenta pressões contínuas por flexibilidade produtiva, redução de custos e maior disponibilidade de peças de reposição, especialmente para componentes plásticos de baixo volume, comuns em veículos fora de linha ou séries especiais. Nesse contexto, este artigo analisa a viabilidade econômica da substituição de cavidades metálicas por cavidades poliméricas fabricadas por Manufatura Aditiva (MA), aplicadas à produção de peças de reposição automotivas. A pesquisa é aplicada, descritiva, quantitativa e baseada em estudo de caso, comparando dois projetos mutuamente excludentes: Projeto A, com cavidade metálica convencional fabricada por Controle Numérico Computacional (CNC), e o Projeto B, com cavidade polimérica impressa em 3D. A avaliação foi conduzida via Metodologia Multi-índice Ampliada (MMIA), abrangendo indicadores de retorno, riscos e sensibilidades, e complementada pela Simulação de Monte Carlo (SMC), mensurando o comportamento sob incerteza. Os resultados determinísticos evidenciaram maior atratividade financeira do Projeto B, pois apresenta maior grau de retorno e menores níveis de riscos e sensibilidades. Na abordagem estocástica, o Projeto B também apresentou desempenho superior, com maior expectativa de retorno e menor risco associado. Conclui-se que a MA aplicada ao *Rapid Tooling* constitui uma alternativa economicamente viável para baixos volumes, contribuindo para reduzir a despesa de capital, o capital imobilizado e os riscos de obsolescência dos estoques. Como contribuição, o estudo integra MA, engenharia econômica e análise de riscos, oferecendo indicadores para decisões industriais sobre ferramentais de baixo volume e reforçando o potencial do *Rapid Tooling* em contextos de baixa escala produtiva e de produção sob demanda.

Palavras-chave: Manufatura aditiva. *Rapid Tooling*. Análise de Viabilidade Econômica Metodologia Multi-índice Ampliada (MMIA). Simulação de Monte Carlo (SMC).

Área Temática: Custos como ferramenta para o planejamento, controle e apoio a decisões.

1 INTRODUÇÃO

A indústria automotiva enfrenta pressões contínuas por flexibilidade produtiva, redução de custos e disponibilidade de peças de reposição. Um dos principais desafios ocorre na gestão de peças plásticas de baixo volume, situação comum em peças de reposição (*spare parts*) de veículos fora de linha ou séries especiais. A produção tradicional por injeção exige moldes metálicos de aço ou alumínio, cujo alto investimento inicial (CAPEX) tende a ser economicamente justificável apenas em grandes volumes. Para atender demandas reduzidas ou intermitentes, as empresas frequentemente recorrem à formação de estoques, assumindo custos de armazenagem, capital imobilizado e risco de obsolescência (*dead stock*) (Ballou, 2006; Mor, Bhardwaj, Kharka, & Kharub, 2021; Ohno, 1997). Nesse cenário, a Manufatura Aditiva (MA) surge como alternativa para a fabricação de ferramentais

rápidos (*Rapid Tooling*), permitindo a produção de insertos ou cavidades poliméricas em menor prazo e com menor CAPEX (Souza, Benatti, Mottin, & David, 2025).

O estudo parte de uma peça plástica automotiva de reposição, tradicionalmente fabricada por injeção em molde metálico de alta capacidade produtiva. Embora esse processo seja tecnicamente consolidado e eficiente para grandes lotes, sua aplicação em baixos volumes pode gerar desequilíbrio econômico entre o investimento em ferramental e a demanda efetiva. Assim, o problema investigado concentra-se na comparação entre duas alternativas mutuamente excludentes: uma cavidade metálica convencional, associada ao processo tradicional de injeção, e uma cavidade polimérica impressa em 3D, associada ao conceito de *Rapid Tooling*.

Essa condição é particularmente relevante quando a demanda residual de uma peça não acompanha a escala econômica normalmente exigida pelo ferramental metálico. Em aplicações convencionais de injeção, a elevada repetibilidade do processo e o baixo custo unitário tornam-se vantajosos quando o investimento inicial é diluído em grandes séries. Entretanto, para lotes reduzidos, a amortização do molde passa a representar uma parcela expressiva do custo total, deslocando a decisão econômica do custo unitário de fabricação para a relação entre CAPEX, horizonte de demanda e o risco de manter estoques por longos períodos. Assim, a análise de viabilidade não deve considerar apenas a capacidade técnica de moldar a peça, mas também a aderência da alternativa tecnológica ao perfil de consumo, à frequência de reposição e à possibilidade de recomposição rápida do ferramental.

A análise busca verificar se a substituição parcial do ferramental convencional por cavidades fabricadas por MA pode reduzir o capital imobilizado e os custos associados à manutenção de estoques, sem desconsiderar restrições técnicas do processo de injeção plástica, como a durabilidade do inserto, a estabilidade dimensional e a resistência às condições termomecânicas de operação.

A literatura recente indica a viabilidade técnica da MA aplicada à injeção plástica, mas ainda apresenta lacunas quanto à avaliação econômico-financeira integrada. Kriesi, Bjelland e Steinert (2017) exploraram a MA em ciclos iterativos de prototipagem rápida; Vasco, Pouzada, Ferreira e Mateus (2019) analisaram impactos técnicos e econômicos em ferramentais; Schuh, Bergweiler, Porschen, Müller e Schmidt (2020) demonstraram a viabilidade de moldes poliméricos com tecnologias de gavetas; Tan, Wang, Ma, Zhou e Chen (2020) evidenciaram ganhos associados ao *conformal cooling*; Kampker, Ay, Geiken, Müller e Pütz (2020) compararam tecnologias aditivas para fabricação de ferramentas poliméricas de injeção; e Souza et al. (2025) reforçaram o potencial de redução de custos e *lead time*, embora ressaltem limitações de durabilidade. Desse modo, permanece uma lacuna quanto à mensuração conjunta de retorno, riscos, sensibilidades e incerteza em projetos de substituição tecnológica voltados à reposição automotiva.

Diante dessa lacuna, formula-se a seguinte questão de pesquisa: em termos de retorno, riscos e sensibilidades, até que ponto a substituição de moldes metálicos usinados por moldes poliméricos fabricados por MA é economicamente viável para a injeção de peças automotivas de baixo volume?

Assim, o objetivo geral deste artigo é analisar a viabilidade econômica comparativa entre o ferramental tradicional usinado em Controle Numérico Computacional (CNC) e o ferramental polimérico fabricado por impressão 3D, aplicado à injeção de peças automotivas de baixo volume, utilizando a Metodologia Multi-índice Ampliada (MMIA) e a Simulação de Monte Carlo (SMC) como suporte à decisão.

A pesquisa justifica-se sob quatro perspectivas. Do ponto de vista teórico, contribui para a integração entre a manufatura aditiva, a engenharia econômica e a

análise de riscos em projetos de investimento. Sob a ótica prática, oferece ao tomador de decisão industrial indicadores para comparar alternativas de ferramental em baixos volumes. No aspecto tecnológico, discute-se a aplicação do *Rapid Tooling* como alternativa ao ferramental metálico convencional. Por fim, no aspecto operacional e social, a redução de estoques físicos e de obsolescência pode contribuir para cadeias de suprimentos mais flexíveis e menos intensivas em capital imobilizado, em consonância com os princípios de eliminação de desperdícios (Ballou, 2006; Mor et al., 2021; Ohno, 1997).

O artigo está estruturado em cinco seções. Após esta introdução, a Seção 2 aborda o referencial teórico. A Seção 3 descreve os delineamentos metodológicos. A Seção 4 apresenta os resultados e as discussões gerados a partir do ambiente computacional. Por fim, a Seção 5 expõe as considerações finais e recomendações para trabalhos futuros.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

O referencial teórico apresentado nesta seção do trabalho baseia-se em 3 aspectos: (i) análise técnica da manufatura aditiva envolvendo o *Rapid Tooling;* (ii) a ferramenta de análise de viabilidade econômica utilizada; e (iii) trabalhos correlatos e identificação da lacuna de pesquisa.

2.1 Análise técnica da Manufatura Aditiva no *Rapid Tooling*

A aplicação da impressão 3D à fabricação de matrizes e insertos para injeção plástica, conhecida como *Soft Tooling* ou *Rapid Tooling*, tem ampliado as possibilidades da ferramentaria em baixos volumes. Tecnologias como Estereolitografia (SLA), *PolyJet* e *Multi Jet Fusion* (MJF) possibilitam a produção de cavidades com considerável precisão dimensional e acabamento superficial adequado a aplicações específicas.

Apesar de seu potencial, o ferramental polimérico apresenta limitações quanto à durabilidade, à resistência mecânica, à pressão de fechamento e à menor condutividade térmica em comparação ao aço (Souza et al., 2025). Para mitigar essas restrições, a literatura recomenda o uso de soluções híbridas, como insertos impressos alojados em bases metálicas conforme apresentado na Figura 1. Farioli, Strano, López, Mendoza e Monno (2021) validaram o uso de insertos 3D alojados em *frames* de aço para suportar a injeção mecânica em pequenos lotes, enquanto Bagalkot, Pons, Clucas e Symons (2019) definiram metodologias para parametrização do ciclo de injeção focadas em estender a vida útil do polímero impresso. O uso de métodos como MJF e SLA para baixos volumes reduz drasticamente os custos iniciais e tem sido amplamente documentado (Formlabs, 2026; Habrman, Chval, Ráž, Kučerová, & Hůla, 2023). Na engenharia automotiva, tais soluções permitem reduzir o volume de material empregado no ferramental em relação aos blocos usinados convencionais (Marconi et al., 2025).

A adoção de moldes impressos em 3D para injeção de baixo volume deve ser compreendida como uma solução de compromisso entre rapidez, custo inicial e vida útil do ferramental. A Formlabs (2026) indica que moldes fabricados por SLA podem reduzir custos e prazos de obtenção quando comparados à usinagem metálica, mantendo a possibilidade de produzir pequenas séries de peças termoplásticas por injeção. Entretanto, essas vantagens dependem da adequação do projeto do molde, da seleção da resina, do acabamento das superfícies funcionais e do controle dos

parâmetros de processo, pois as condições de injeção envolvem pressão, temperatura e esforços de fechamento que podem acelerar a degradação do inserto polimérico.



Figura 1. Inserto polimérico impresso alojado em base metálica
Fonte: Formlabs (2026)

2.2 Análise de viabilidade econômica de projetos

A decisão de transição tecnológica exige ferramentas de engenharia econômica capazes de avaliar a geração de valor (expectativa de retorno), a exposição aos riscos e as sensibilidades das variáveis críticas (Souza & Clemente, 2015; Lima et al., 2015). A MMIA avalia um Projeto de Investimento (PI) pelas dimensões de retorno, riscos e sensibilidades, contemplando indicadores como VPL, VPL Anualizado (VPLA), Índice de Benefício/Custo (IBC), Retorno Adicional sobre o Investimento (ROIA), Taxa Interna de Retorno (TIR), *Payback*, TMA/TIR (sendo TMA, a Taxa Mínima de Atratividade ou taxa de desconto), Limites de Elasticidade (LEs) e Valores-Limite (VLs) (Lima et al., 2015; Lima et al., 2017; Lima & Southier, 2026).

A exposição aos riscos financeiros, especialmente por meio do índice TMA/TIR, é relevante para avaliar a margem de segurança econômica do projeto (Harzer, 2015). Quando há incerteza em variáveis como demanda, investimento inicial (CAPEX) e custo de capital (TMA), recomenda-se complementar a análise determinística com a Simulação de Monte Carlo (SMC), o que permite estimar distribuições probabilísticas do VPL e métricas de riscos (Lima et al., 2017; Lima et al., 2024). A literatura recente também aponta a Teoria das Opções Reais (TOR) como uma abordagem útil para valorar flexibilidades gerenciais em ambientes incertos, tais como a expansão, o abandono ou a postergação de investimentos (Dranka et al., 2025).

A combinação entre MMIA e SMC amplia a capacidade analítica ao evitar que a decisão se baseie apenas em indicadores médios e determinísticos. Enquanto a MMIA organiza a avaliação em dimensões complementares, permitindo observar simultaneamente a geração de valor, os riscos associados e os limites de variação das variáveis críticas, a SMC representa a dispersão dos possíveis resultados quando os parâmetros econômicos não são conhecidos com certeza; além disso, a SMC permite estimar a probabilidade de insucesso financeiro, o valor médio esperado e o *Conditional Expected Loss* – CEL (Lima et al., 2024). Essa integração é especialmente adequada para projetos de substituição tecnológica, em que o menor CAPEX pode

ser acompanhado por dúvidas quanto à vida útil do ferramental, à recomposição periódica do inserto e à estabilidade da demanda.

Neste estudo, os cálculos determinísticos e estocásticos foram processados no ambiente computacional de acesso livre $AVEPI® (Lima & Southier, 2026; Lima et al., 2026), desenvolvido na Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), com foco nas abordagens MMIA e SMC.

2.3 Trabalhos correlatos e lacuna de pesquisa

O Quadro 1 sintetiza publicações recentes focadas na integração de MA na ferramentaria. O objetivo desse quadro é identificar as principais contribuições dos trabalhos correlatos e a lacuna de pesquisa associada a este trabalho.

Autores (ano)	Veículo	Abordagens de análise	Principais achados
Kriesi et al. (2017)	*Procedia Manufacturing*	Prototipagem rápida iterativa aplicada à injeção.	Evidencia a utilidade da MA para reduzir ciclos de desenvolvimento e validar soluções de ferramental em menor prazo.
Vasco et al. (2019)	*Rapid Prototyping Journal*	Avaliação técnica e de impacto econômico.	Identifica impacto econômico substancial em ferramentais automotivos ao evitar altos CAPEX em séries intermitentes.
Bagalkot et al. (2019)	*Rapid Prototyping Journal*	Definição de parâmetros de processo para insertos poliméricos.	Mostra que a parametrização adequada do ciclo de injeção é essencial para ampliar a vida útil dos insertos impressos.
Schuh et al. (2020)	Procedia CIRP	Capabilidade de processo em moldes poliméricos com gavetas.	Demonstra viabilidade técnica de moldes poliméricos em configurações mais complexas, respeitando limitações operacionais.
Tan et al. (2020)	*Materials & Design*	Projeto e fabricação aditiva de moldes com resfriamento conformal.	Evidencia ganhos técnicos associados ao controle térmico e à otimização geométrica de moldes fabricados por MA.
Kampker et al. (2020)	*Progress in Digital and Physical Manufacturing*	Comparação tecnológica e econômica de processos aditivos.	Compara alternativas de MA para ferramentas poliméricas de injeção e reforça a relevância da análise econômica na escolha tecnológica.
Farioli et al. (2021)	*ESAFORM 2021*	Insertos impressos alojados em estruturas metálicas.	Valida soluções híbridas para suportar esforços de injeção em pequenos lotes e reduzir limitações mecânicas dos polímeros.
Marconi et al. (2025)	*Int. J. Adv. Manuf. Technol.*	Otimização e validação técnica de ferramentas híbridas.	A combinação de insertos impressos com bases usinadas viabiliza a injeção para baixos volumes com estabilidade térmica.
Souza et al. (2025)	Revista Sítio Novo	Revisão sistemática sobre FDM e resinas fotocuráveis.	A MA reduz custos e lead time, mas evidencia a necessidade de estudos econômicos detalhados sobre o ciclo de vida do ferramental.

Quadro 1 – Resumo das publicações sobre viabilidade técnica e econômica da MA em moldes

Fonte: Elaborado pelos autores

Ao analisar mais de forma mais aprofundada os trabalhos mencionados no Quadro 1, embora a literatura valide tecnicamente o uso do *Rapid Tooling*, identifica-se uma lacuna de pesquisa. Ainda são limitados os estudos que integram MMIA e SMC para mensurar, de forma conjunta, o retorno, os riscos probabilísticos e as sensibilidades em projetos de substituição de ferramental voltados à reposição automotiva.

A síntese dos trabalhos correlatos também evidencia que diferentes estudos abordam a MA em ferramentaria sob perspectivas predominantemente técnicas, como a capabilidade de processo, a seleção de parâmetros, o resfriamento conformal, a vida útil e a validação geométrica. Em menor proporção, alguns autores discutem impactos econômicos associados à redução de ciclo, diminuição de refugo, menor tempo de desenvolvimento e redução de investimento inicial. Ainda assim, a avaliação econômica costuma aparecer como consequência de resultados técnicos, e não como eixo estruturante de decisão com indicadores de retorno, riscos, sensibilidades e incertezas avaliados de forma integrada.

3 METODOLOGIA

A Figura 2 apresenta o fluxograma metodológico da pesquisa que foi dividida em 8 etapas. Cada uma das etapas foi detalhada na sequência deste artigo.

3.1 Classificação da Pesquisa

A pesquisa classifica-se como aplicada, descritiva, quantitativa e baseada em estudo de caso. O objeto de análise corresponde a uma peça plástica automotiva de reposição, atualmente fabricada por injeção plástica em molde metálico de alta capacidade produtiva.

A comparação foi estruturada entre dois projetos mutuamente excludentes: o Projeto A, baseado na usinagem de uma cavidade metálica convencional em CNC, e o Projeto B, baseado na fabricação de uma cavidade polimérica por MA para aplicação em *Rapid Tooling*. Essa estruturação também se alinha à abordagem de desenvolvimento de estudos aplicados em Engenharia Econômica, na qual a elaboração de artigos científicos pode atuar como estratégia de consolidação conceitual, análise crítica e avaliação de projetos de investimento (Lima, Colombo, Petri, & Oliveira, 2023).

3.2 Coleta de Dados e Configuração do Projeto de Investimento

Os dados empregados nesta pesquisa foram obtidos a partir de informações internas de uma empresa automobilística e devidamente descaracterizados para assegurar a confidencialidade das informações corporativas e a proteção da propriedade intelectual relacionada ao objeto de estudo. Após essa etapa, os dados foram parametrizados no ambiente computacional $AVEPI®, que serviu de base para a geração dos indicadores que permitiram as análises determinísticas e estocásticas conduzidas nesta pesquisa.

A descaracterização dos dados foi conduzida de modo a preservar a lógica econômica do caso sem revelar informações sensíveis da organização, como identificação da peça, códigos internos, fornecedores, desenhos técnicos, geometria funcional ou dados comerciais estratégicos. Dessa forma, os valores utilizados permanecem adequados para a simulação de viabilidade, mas não permitem a rastreabilidade direta do componente analisado. Essa decisão metodológica é

compatível com estudos aplicados em ambiente industrial, nos quais a validade da análise depende da preservação das relações econômicas fundamentais, como investimento, demanda, preço, custo variável e horizonte de planejamento.

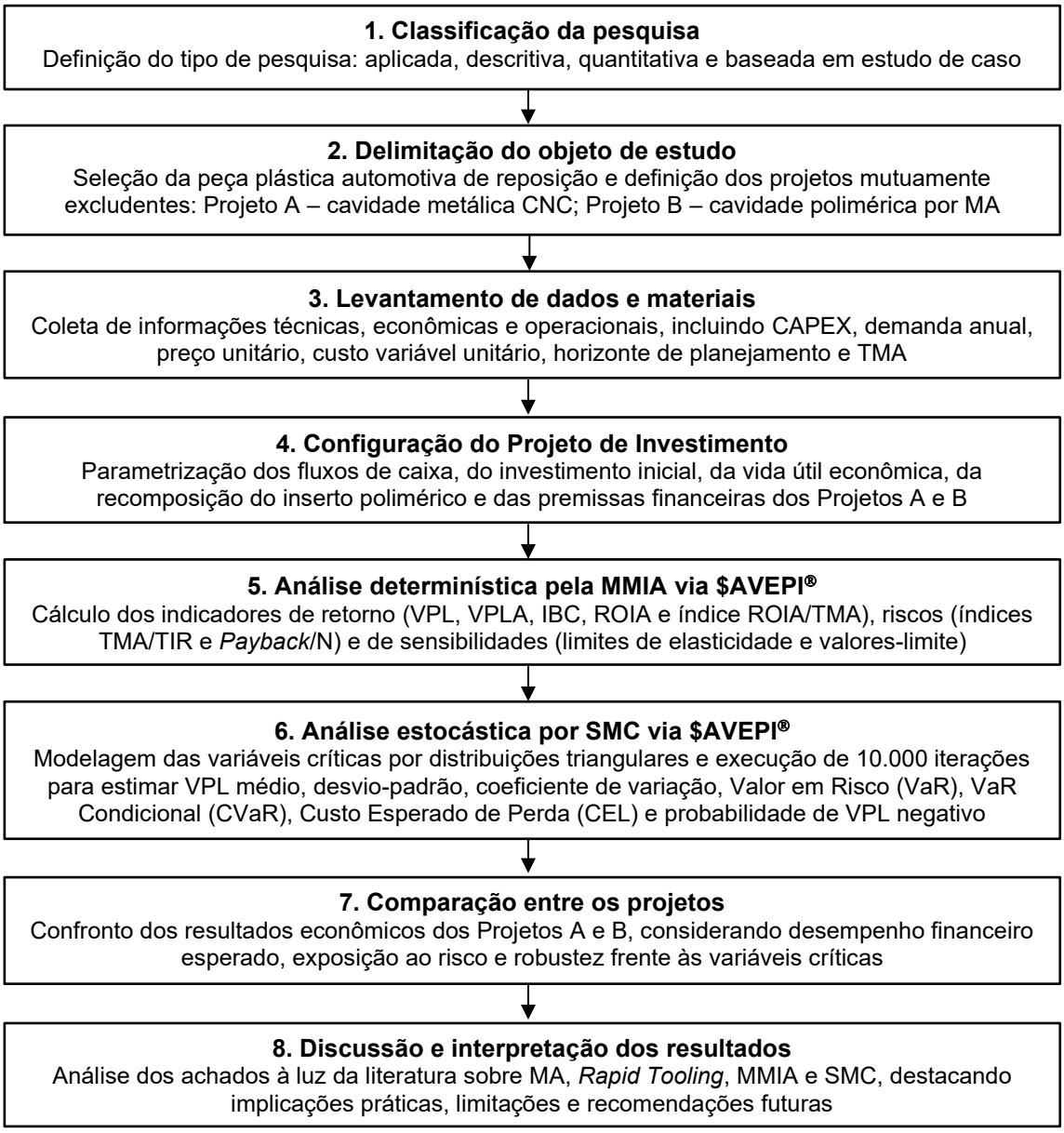


Figura 2 – Fluxograma metodológico da pesquisa

Fonte: Elaborada pelos autores

O horizonte de planejamento (N) adotado foi de 5 anos, com lote anual de 200 peças. A TMA foi definida em 16,00% ao ano, conforme a taxa preconizada internamente pela empresa, estabelecida com base no custo de oportunidade acrescido de uma taxa de risco associada ao país estudado. O investimento inicial (FC_0) foi estimado em R$ 15.000,00 para o Projeto A e em R$ 1.250,00 para o Projeto B. O Preço de Venda unitário (PVu) foi fixado em R$ 128,10 (desconsiderando os impostos) e o Custo Variável unitário (CVu) em R$ 51,50, contemplando despesas operacionais, logísticas e de estocagem atribuídas à peça, em consonância com a distinção entre custos variáveis e demais componentes de custeio apresentada por Martins (2018).

Considerou-se que os Fluxos de Caixa (FC) utilizados são líquidos para fins de análise econômica, sem detalhamento do Imposto de Renda (IR) e da Contribuição Social sobre o Lucro Líquido (CSLL). Não houve financiamento de terceiros; assumiu-se apenas capital próprio. Também não foi atribuído Valor Residual (VR) aos moldes ao final do horizonte de análise (N). A depreciação contábil não foi utilizada como variável determinante do FC econômico, pois a análise priorizou desembolsos, receitas e economias diretamente associadas ao PI.

No cenário determinístico, o Projeto A apresentou FC anual (FCj) constante de R$ 15.320,00 ao longo dos 5 anos. Para o Projeto B, o FCj foi de R$ 15.320,00 no primeiro ano e de R$ 14.070,00 do 2º ao 5º ano, em razão da recomposição periódica do inserto polimérico, conforme parametrização realizada no $AVEPI®. A análise de viabilidade econômica foi conduzida pela MMIA, considerando indicadores de retorno, riscos e sensibilidades (Lima et al., 2025; Lima & Southier, 2026; Lima et al., 2026).

A abordagem estocástica foi conduzida por SMC, com 10.000 iterações no $AVEPI®. Foram atribuídas distribuições triangulares às variáveis consideradas críticas. A TMA variou entre 14,40% (cenário otimista), 16,00% (mais provável) e 17,60% (pessimista). O FC_0 do Projeto A foi modelado entre R$ 10.000,00, R$ 15.000,00 e R$ 20.000,00, mantendo coerência com o investimento-base utilizado na MMIA determinística, enquanto o FC_0 do Projeto B variou entre R$ 1.000,00, R$ 1.250,00 e R$ 1.500,00. A demanda anual foi representada por uma distribuição triangular, com mínimo de 150, valor mais provável de 200 e máximo de 250 peças. As faixas adotadas foram definidas com base na parametrização técnica do estudo de caso e nas condições operacionais do processo analisado. A TOR não foi aplicada quantitativamente nesta etapa; entretanto, suas possibilidades são discutidas como extensão futura, especialmente para valorar opções de expansão, de alteração de geometria e de abandono do ferramental (Dranka et al., 2025).

A escolha da distribuição triangular para as variáveis críticas decorreu de sua adequação a estudos de viabilidade, nos quais há estimativas mínima, mais provável e máxima, mas não há série histórica suficiente para o ajuste de distribuições estatísticas mais complexas. Essa forma de modelagem permite representar a incerteza de maneira transparente e compatível com o contexto industrial do estudo de caso, especialmente porque a demanda por peças de reposição e o custo de recomposição do inserto podem variar conforme as condições operacionais, a vida útil efetiva do ferramental, o *mix* de produção e a prioridade logística.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados e as discussões foram estruturados para avaliar a viabilidade econômica da aplicação da MA em ferramentais de injeção destinados a peças automotivas de baixo volume. Inicialmente, apresentam-se a caracterização econômica do PI e os parâmetros utilizados na modelagem dos FCs. Em seguida, são discutidos os resultados determinísticos obtidos pela aplicação da MMIA e os resultados estocásticos gerados pela SMC, permitindo analisar o retorno, os riscos, as sensibilidades e o comportamento dos indicadores econômicos sob incerteza.

Por fim, os resultados são confrontados com a literatura especializada, evidenciando as contribuições teóricas e práticas da utilização de cavidades poliméricas produzidas por MA como alternativa ao ferramental convencional em cenários de baixa demanda.

4.1 Caracterização econômica do Projeto de Investimento

O PI analisado consiste na substituição parcial de uma cavidade metálica convencional por uma cavidade polimérica fabricada por MA para produção de peças plásticas automotivas de baixo volume. O CAPEX correspondeu ao custo de fabricação do ferramental em cada alternativa: R$ 15.000,00 para o molde metálico usinado em CNC e R$ 1.250,00 para o inserto polimérico impresso em 3D, considerando que a empresa já dispõe dos equipamentos necessários à fabricação dessas cavidades.

As despesas operacionais (OPEX) foram representadas pelo CVu de R$ 51,50, composto por parcelas operacionais, logísticas e de estocagem. As receitas foram calculadas com base no PVu de R$ 128,10 e na demanda anual de 200 peças. Esses parâmetros sustentaram a formação dos FCs utilizados nas análises determinística e estocástica. No Projeto B, considerou-se uma dedução anual de R$ 1.250,00 a partir do 2º ano, associada à recomposição periódica do inserto polimérico, o que resultou em FCj de R$ 14.070,00 entre os anos 2 e 5. Os valores estão dispostos na Tabela 1.

Tabela 1

Formação econômica dos Projetos A e B

Item	Projeto A – CNC	Projeto B – MA
Investimento inicial – FC_0 (CAPEX)	R$ 15.000,00	R$ 1.250,00
Demanda anual	200 peças	
Preço de Venda unitário – PVu	R$ 128,10	
Receita anual estimada	R$ 25.620,00	
Custo Variável unitário – CVu	R$ 51,50	
Custo variável anual	R$ 10.300,00	
Fluxo de caixa operacional antes da recomposição do inserto	R$ 15.320,00	
FCj considerado no $AVEPI®	R$ 15.320,00/ano	R$ 15.320,00 (ano 1) R$ 14.070,00 (ano 2-5)

Fonte: Elaborada pelos autores com base nos dados parametrizados no $AVEPI®.

4.2 Aplicação da MMIA - abordagem determinística

A diferença entre os investimentos iniciais refletiu-se diretamente nos indicadores gerados pelo $AVEPI® (Tabela 2), evidenciando a vantagem econômica do ferramental aditivo em contexto de baixo volume.

Na dimensão de retorno, o Projeto B apresentou desempenho superior ao do Projeto A em todos os indicadores avaliados. O VPL do Projeto B alcançou R$ 45.896,90, frente a R$ 35.162,18 do Projeto A, enquanto o ROIA foi de 106,68%, contra 27,31%. Na dimensão de riscos, o Projeto B recuperou o capital em um ano, ao passo que o Projeto A apresentou *Payback* de dois anos. O índice TMA/TIR de 1,31% no Projeto B indica menor exposição a riscos financeiros em comparação com os 16,19% do Projeto A.

Já na dimensão de sensibilidades, o Projeto B também se mostrou mais robusto, apresentando maior tolerância a variações no investimento inicial (FC_0) e nos FCj sem comprometer a geração de valor econômico. Dessa forma, o confronto entre retorno, riscos e sensibilidades confirma maior atratividade econômica do Projeto B, conforme a lógica da MMIA e os critérios propostos por Lima et al. (2026).

A interpretação desses indicadores deve considerar que a superioridade do Projeto B não decorre apenas do menor investimento inicial, mas também da combinação de baixo CAPEX e de elevada margem de segurança em relação às

variáveis analisadas. O IBC mais elevado demonstra que o benefício econômico gerado por unidade monetária investida é substancialmente superior na alternativa aditiva, enquanto o índice ROIA/TMA indica um retorno adicional expressivo em relação à taxa mínima exigida. Em termos gerenciais, isso significa que a alternativa por MA amplia a flexibilidade de decisão, pois reduz a exposição financeira antes mesmo que a demanda futura seja plenamente confirmada.

Tabela 2
Indicadores da MMIA para os Projetos A e B

Dimensão	Indicador	Projeto A (CNC)	Projeto B (MA)	Orientação
Retorno	VPL (R$)	35.162,18	45.896,90	Quanto > Melhor
	VPLA (R$)	10.738,86	14.017,34	Quanto > Melhor
	IBC	3,3441	37,7175	Quanto > Melhor
	ROIA (%)	27,31%	106,68%	Quanto > Melhor
	Índice ROIA/TMA	170,68%	666,78%	Quanto > Melhor
Riscos	*Payback* (anos)	2	1	Quanto < Melhor
	TIR (%)	98,85%	1.217,97%	Quanto > Melhor
	Índice *Payback*/N	40,00%	20,00%	Quanto < Melhor
	Índice TMA/TIR	16,19%	1,31%	Quanto < Melhor
Sensibilidades	Δ%TMA	517,80%	7.512,34%	Quanto > Melhor
	Δ%FC_0	234,41%	3.671,75%	Quanto > Melhor
	Δ%FCj	70,10%	97,35%	Quanto > Melhor

Fonte: Dados gerados pelos autores via $AVEPI®.

4.3 Aplicação da SMC - abordagem estocástica

A SMC confirmou a resiliência econômica do Projeto B diante da variação simultânea das variáveis críticas. A simulação com 10.000 iterações apresentou os seguintes resultados:

- **Projeto A (CNC):** VPL médio de R$ 35.182,30; desvio-padrão de R$ 3.216,30; coeficiente de variação de 9,14%; e intervalo de confiança de 95% com valores de R$ 24.688,04 a R$ 46.805,63.
- **Projeto B (MA):** VPL médio de R$ 48.897,01; desvio-padrão de R$ 2.491,29; coeficiente de variação de apenas 5,09%; e intervalo de confiança de 95% com valores de R$ 40.809,15 a R$ 57.954,91.

Em ambos os casos, a probabilidade de VPL negativo foi nula (P[VPL<0]=0%). A análise complementar dos indicadores de risco estocástico reforçou a superioridade do Projeto B, mesmo considerando, no Projeto A, um intervalo de FC_0 coerente com o valor-base utilizado na MMIA determinística. Ao nível de 5%, foram considerados o Valor em Risco (*Value at Risk* – VaR) e o Valor Condicional em Risco (*Conditional Value at Risk* – CVaR), sendo que não existe o Custo Esperado de Perda (CEL) por não existir VPL < 0. O Projeto A apresentou $VaR_{5\%}$ de R$ 29.891,96 e $CVaR_{5\%}$ de R$ 28.599,36, enquanto o Projeto B apresentou $VaR_{5\%}$ de R$ 44.834,16 e $CVaR_{5\%}$ de R$ 43.884,56. Esses resultados indicam que, sob incerteza, o Projeto B apresenta maior geração de valor econômico em comparação ao Projeto A.

A análise dos valores extremos simulados também contribui para a interpretação da robustez econômica. O menor VPL observado no Projeto B permaneceu acima do maior patamar de perda tolerável para rejeição do investimento, enquanto o intervalo de resultados apresentou menor dispersão relativa em

comparação ao Projeto A. O menor coeficiente de variação do Projeto B indica comportamento mais homogêneo dos resultados simulados, o que reforça a atratividade da alternativa quando o tomador de decisão busca não apenas maximizar retorno esperado, mas também reduzir a variabilidade dos resultados sob cenários operacionais incertos.

Tabela 3

Indicadores $VaR_{5\%}$ e $CVaR_{5\%}$ da SMC para os Projetos A e B

Projeto	Nível α	$VaR_{5\%}$ (R$)	$CVaR_{5\%}$ (R$)
Projeto A – CNC	1%	27.700,07	26.833,20
Projeto A – CNC	5%	29.891,96	28.599,36
Projeto A – CNC	10%	31.060,45	29.581,24
Projeto B – MA	1%	43.150,61	42.403,82
Projeto B – MA	5%	44.834,16	43.884,56
Projeto B – MA	10%	45.731,66	44.605,01

Fonte: Dados gerados pelos autores via $AVEPI®

4.4 Discussão

Os resultados dialogam com a literatura apresentada. O desempenho do Projeto B corrobora os achados de Kampker et al. (2020), Marconi et al. (2025), Schuh et al. (2020) e Vasco et al. (2019), que destacam o potencial técnico e econômico de moldes poliméricos e híbridos para pequenos lotes. A redução do investimento inicial também converge com Souza et al. (2025), que apontam ganhos de custo e de *lead time* na aplicação de MA em moldes de injeção. Além da superioridade determinística, os indicadores estocásticos apresentados na Tabela 3 reforçam a robustez do Projeto B, uma vez que seus valores de VaR e CVaR permaneceram superiores aos do Projeto A em todos os níveis de significância analisados.

Do ponto de vista logístico, a possibilidade de produzir sob demanda reduz a necessidade de estoque pulmonar e alinha-se à lógica de redução de desperdícios e de capital imobilizado discutida por Ballou (2006), Bowersox e Closs (2001), Mor et al. (2021) e Ohno (1997). Entretanto, os limites técnicos relacionados à durabilidade dos insertos, ao estresse termomecânico e à repetibilidade do processo reforçam a ideia de que a aplicação deve permanecer concentrada em baixos volumes, conforme alertam Bagalkot et al. (2021) e Souza et al. (2025).

Essa discussão também permite diferenciar o papel do ferramental polimérico do ferramental metálico convencional. O molde metálico permanece mais adequado para séries longas, ciclos intensivos e aplicações que exigem alta durabilidade, elevada condutividade térmica e estabilidade dimensional prolongada. O ferramental polimérico, por sua vez, mostra maior aderência a cenários de baixo volume, de validação funcional, de recomposição rápida e de produção sob demanda. Portanto, a contribuição do estudo não é propor a substituição generalizada do ferramental convencional, mas delimitar uma faixa de aplicação na qual a MA pode complementar a ferramentaria tradicional e reduzir barreiras econômicas em demandas residuais ou intermitentes.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo analisou a viabilidade econômica da substituição parcial de ferramental metálico convencional por cavidades poliméricas fabricadas por MA, aplicadas ao conceito de *Rapid Tooling*, no contexto de peças plásticas automotivas

de baixo volume. A problemática central esteve associada ao elevado CAPEX do ferramental tradicional, à necessidade de formação de estoques físicos e ao risco de obsolescência em demandas reduzidas ou intermitentes.

A questão de pesquisa foi respondida ao demonstrar que, nas dimensões de retorno, riscos, sensibilidades e incerteza estocástica, a substituição de moldes metálicos por moldes poliméricos fabricados por meio de MA é economicamente viável para peças automotivas de baixo volume. O objetivo do artigo também foi atendido, pois a comparação entre o Projeto A e o Projeto B, por meio da MMIA e da SMC, evidenciou superioridade econômica do Projeto B.

Na análise determinística, o Projeto B apresentou VPL de R$ 45.896,90, *Payback* de um ano, índice TMA/TIR de 1,31% e maior robustez nos limites de sensibilidade, evidenciando maior tolerância a variações no investimento inicial e nos fluxos de caixa projetados. Na análise estocástica, o Projeto B também apresentou desempenho superior, com VPL médio de R$ 48.897,01, $VaR_{5\%}$ de R$ 44.834,16 e $CVaR_{5\%}$ de R$ 43.884,56, valores superiores aos observados no Projeto A, que registrou VPL médio de R$ 35.182,30, $VaR_{5\%}$ de R$ 29.891,96 e $CVaR_{5\%}$ de R$ 28.599,36.

Além disso, ambos os projetos apresentaram probabilidade de fracasso financeiro nula (P[VPL<0]=0%) dada a variabilidade permitida nos dados de entrada, indicando ausência de perdas esperadas nas simulações realizadas. Esses resultados reforçam a atratividade do *Rapid Tooling* por MA e indicam implicações práticas para a redução do capital imobilizado, o aumento da flexibilidade produtiva e a mitigação dos riscos associados à obsolescência dos estoques.

Como limitações, destacam-se a dependência de dados internos de um único estudo de caso e a ausência de ensaios mecânicos prolongados dos insertos sob diferentes condições de injeção. Além disso, o estresse termomecânico dos insertos fotocuráveis e a suscetibilidade a falhas em geometrias elevadas restringem a aplicação a baixas tiragens (Bagalkot et al., 2021; Souza et al., 2025).

Do ponto de vista gerencial, os achados indicam que a análise de viabilidade de soluções de *Rapid Tooling* deve ser conduzida caso a caso, considerando não apenas o custo de fabricação do inserto, mas também o padrão de demanda, a frequência de recomposição, a criticidade da peça, a disponibilidade de capacidade interna de impressão e a tolerância da organização aos riscos técnicos. Essa abordagem evita decisões baseadas exclusivamente no entusiasmo tecnológico ou em comparações de custo simplistas, reforçando a necessidade de integrar engenharia econômica, conhecimento de processo e critérios operacionais de qualidade.

Para trabalhos futuros, recomenda-se ampliar a amostra de peças e materiais, realizar validações experimentais da vida útil do ferramental e, como aprofundamento futuro, aplicar a Teoria das Opções Reais (TOR) para precificar flexibilidades estratégicas da MA, como expansão, alteração rápida de geometria e abandono do molde, conforme os frameworks estocásticos propostos por Dranka et al. (2025).

REFERÊNCIAS

Bagalkot, A., Pons, D., Clucas, D., & Symons, D. (2019). *A methodology for setting the injection moulding process parameters for polymer rapid tooling inserts. Rapid Prototyping Journal*, 25, 1493-1505. https://doi.org/10.1108/RPJ-10-2017-0217

Bagalkot, A., Pons, D., Clucas, D., & Symons, D. (2021). *Analysis of raised feature failures on 3D printed injection moulds. Polymers*, *13, 1541-1569*. https://doi.org/10.3390/polym13101541

Ballou, R. H. (2006). Logística empresarial: Transportes, administração de materiais e distribuição física (1ª ed.). Atlas.

Bowersox, D. J., & Closs, D. J. (2001). Logística empresarial: O processo de integração da cadeia de suprimentos (1ª ed.). Atlas.

Dranka, G. G., Lima, J. D. de, Setti, D., Oliveira, G. A., Trentin, M. G., Sirota, T. R. S., & Ferreira, P. (2025). *Towards a rational framework for economic and risk assessment of energy efficiency projects. Sustainable Energy Technologies and Assessments, 73*. https://doi.org/10.1016/j.seta.2024.104090

Farioli, D., Strano, M., López, E., Mendoza, V., & Monno, M. (2021). *Rapid tooling for injection molding inserts. ESAFORM 2021*. *24th International Conference on Material Forming, Liège, Belgique.* https://doi.org/10.25518/esaform21.4186

Formlabs. (2026). *Low-volume rapid injection molding with 3D printed molds*. https://formlabs.com/applications/injection-molding/ Acesso em: 15 jul. 2026.

Habrman, M., Chval, Z., Ráž, K., Kučerová, L., & Hůla, F. (2023). *Injection Moulding into 3D-Printed Plastic Inserts Produced Using the Multi Jet Fusion Method. Materials,* 16(13), 4747. https://doi.org/10.3390/ma16134747

Harzer, J. H. (2015). Avaliação do risco financeiro em projetos de investimentos a partir da relação TMA/TIR: Uma contribuição à metodologia multi-índice. Tese de doutorado. Pontifícia Universidade Católica do Paraná. 244 p. https://archivum.grupomarista.org.br/pergamumweb/vinculos/00005a/00005a7a.pdf

Kampker, A., Ay, M., Geiken, M., Müller, M., & Pütz, S. (2020). *Technological and economic comparison of additive manufacturing technologies for fabrication of polymer tools for injection molding. In Progress in digital and physical manufacturing,* 28-39. Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-29041-2_4

Kriesi, C., Bjelland, Ø., & Steinert, M. (2017). *Fast and iterative prototyping for injection molding: A case study of rapidly prototyping. Procedia Manufacturing*, 21, 205-212. https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.02.112

Lima, J. D. de, Silva, R. da R. da, Dranka, G. G., Ribeiro, M. H. D. M., & Southier, L. F. P. (2024). *Introducing conditional expected loss: A novel metric for risk investment analysis. The Engineering Economist*. https://doi.org/10.1080/0013791X.2024.2431339

Lima, J. D. de, & Southier, L. F. P. (2026). Guia prático para usuário do $AVEPI®: *Sistema* de análise de viabilidade econômica de projetos de investimento. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. 212 p. https://pb.utfpr.edu.br/savepi/materiais%20de%20apoio/ManualSAVEPI.pdf

Lima, J. D. de, Trentin, M. G., Oliveira, G. A., Batistus, D. R., & Setti, D. (2017). *Systematic analysis of economic viability with stochastic approach: A proposal for investment. In Engineering systems and networks,* 317-325. *Springer*. https://doi.org/10.1007/978-3-319-45748-2_34

Lima, J. D. de, Colombo, J. A. A., Petri, J. M., & Oliveira, G. A. (2023). Desenvolvimento de artigos científicos como estratégia de ensino-aprendizagem-avaliação em Engenharia Econômica. Relatos de experiências em Engenharia de Produção (1ª ed.). ABEPRO. https://doi.org/10.14488/encep.9786588212059.43-58

Lima, J. D. de, Rosa, R. da S., Dranka, G. G., Ribeiro, M. H. D. M, Southier, L. F. P., & Afonso, P. (2026). *Rethinking investment projects with real options: a stochastic valuation framework using Monte Carlo simulation.* Springer Nature Link. XXXII IJCIEOM, Aveiro, Portugal, June 22–24, 2026.

Lima, J. D. de, Trentin, M. G., Oliveira, G. A., Batistus, D. R., & Setti, D. (2015). *A systematic approach for the analysis of the economic viability of investment projects*. International Journal of Engineering Management and Economics. v. 5, n. 1/2. 2015. p. 19-34. http://www.inderscience.com/offer.php?id=69887

Marconi, P. G. C. S., Beal, V. E., Ribeiro Junior, A. S., Ferreira, C. V., & Pisanu, L. (2025). *Systematic approach for injection mold rapid tooling. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 141, 5681–5696. https://doi.org/10.1007/s00170-025-17024-2

Mor, R. S., Bhardwaj, A., Kharka, V., & Kharub, M. (2021). *Spare parts inventory management in the warehouse: A lean approach. International Journal of Industrial Engineering and Production Research, 32*(2), 179–189. https://doi.org/10.22068/ijiepr.32.2.179

Martins, E. (2018). Contabilidade de custos (11ª ed.). Atlas.

Ohno, T. (1997). O sistema Toyota de produção: Além da produção em larga escala (1ª ed.). Bookman.

Schuh, G., Bergweiler, G., Porschen, M., Müller, J., & Schmidt, M. (2020). *Feasibility and process capability of polymer additive injection molds with slide technology*. Procedia CIRP, 93, 102-107. https://doi.org/10.1016/j.procir.2020.03.057

Souza, A., & Clemente, A. (2015). Decisões financeiras e análises de investimentos: Conceitos, técnicas e aplicações (2ª ed.). Atlas.

Souza, A. C. S. de, Benatti, L. P., Mottin, A. C., & David, E. C. S. (2025). Aplicações da impressão 3D na fabricação de moldes para injeção de termoplásticos: uma revisão da literatura. Revista Sítio Novo, 9, e1802. https://doi.org/10.47236/2594-7036.2025.v9.1802

Tan, C., Wang, D., Ma, W., Zhou, K., & Chen, W. (2020). *Design and additive manufacturing of novel conformal cooling molds. Materials & Design*, 196, 109147. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2020.109147

Vasco, J. C., Pouzada, A. S., Ferreira, E. C., & Mateus, A. (2019). *Additive manufacturing applied to injection moulding: Technical and economic impact. Rapid Prototyping Journal*, 25, 1241-1249. https://doi.org/10.1108/RPJ-07-2018-0179