



Disponibilidade De Moldes E Máquinas Como Fatores De Eficiência Operacional: Uma Abordagem Por Simulação No Software Arena®

Débora do Nascimento Lima

Universidade Federal Fluminense / debora_nascimento@id.uff.br

Ilton Curty Leal Junior

Universidade Federal Fluminense / iltoncurty@id.uff.br

Ricardo Cesar Da Silva Guabiroba

Universidade Federal Fluminense / ricardocesar@id.uff.br

Ualison Rébula de Oliveira

Universidade Federal Fluminense / ualisonrebula@id.uff.br

RESUMO:

A eficiência produtiva em sistemas que dependem de recursos altamente específicos, como moldes e máquinas, constitui um desafio relevante para a indústria de transformação plástica. Este estudo busca verificar, por meio de simulação de eventos discretos no software Arena®, como diferentes níveis de disponibilidade de moldes e máquinas influenciam a eficiência produtiva de uma fábrica, identificando o recurso restritivo e verificando se o aumento da disponibilidade dos moldes é capaz de elevar a produtividade e melhorar o desempenho operacional. A pesquisa analisa uma fábrica de caixas térmicas por meio da Simulação de Eventos Discretos, utilizada para representar o fluxo produtivo real, avaliar cenários alternativos e apoiar a tomada de decisão no planejamento da produção. Com base em dados reais, foram modeladas três configurações operacionais, variando-se a disponibilidade de moldes e máquinas. Os resultados indicam que os moldes constituem a principal restrição do sistema, gerando ociosidade das máquinas mesmo com capacidade instalada disponível. O aumento da permanência dos moldes elevou a produção, enquanto a ampliação da carga horária das máquinas não apresentou impactos relevantes, evidenciando a ineficácia de intervenções em recursos não restritivos.

PALAVRAS-CHAVE: Gestão de Gargalos. Disponibilidade de Equipamentos. Simulação de Eventos Discretos. Arena Software. Eficiência operacional

1. Introdução

Realização:



O setor industrial é um dos pilares do desenvolvimento econômico. Ele é responsável pela transformação de matérias-primas em produtos acabados que atendem ao mercado consumidor e sustentam diversas cadeias produtivas (Kaldor, 1967; Chang, 2002). Segundo a Confederação Nacional da Indústria (CNI, 2025), a indústria respondeu por 24,7% do Produto Interno Bruto brasileiro em 2024. Além disso, o setor empregou formalmente cerca de 11,5 milhões de trabalhadores, o que corresponde a aproximadamente 21% dos empregos formais do país.

Inserida nesse contexto, a empresa analisada neste estudo é uma indústria metalúrgica e de transformação plástica que atua na fabricação de bens de consumo duráveis, atendendo diferentes segmentos do mercado. A organização possui três unidades fabris e um portfólio diversificado de produtos, incluindo itens metálicos e plásticos, como escadas domésticas, cadeiras, caixas térmicas e outros componentes utilizados em processos de montagem. No âmbito produtivo, destaca-se a atuação da fábrica responsável pela injeção plástica, setor que concentra a produção de peças intermediárias essenciais para a montagem dos produtos e que apresenta elevada variabilidade de itens e volumes produzidos.

No caso específico da produção de caixas térmicas, o sistema produtivo é caracterizado pela interdependência entre máquinas injetoras e moldes exclusivos. A unidade conta com um conjunto significativo de máquinas, operando de forma contínua conforme o planejamento definido pelo setor de Planejamento e Controle da Produção (PCP). Entretanto, os moldes utilizados na injeção plástica são compartilhados entre as unidades fabris da empresa, circulando conforme um cronograma de rodízio previamente estabelecido. Na prática, essa dinâmica faz com que a produção de determinados itens seja interrompida quando o molde correspondente não está fisicamente disponível na unidade, mesmo havendo capacidade instalada de máquinas, o que pode gerar ociosidade, filas e atrasos no atendimento das demandas internas.

Nesse tipo de ambiente produtivo, a eficiência operacional torna-se um elemento central para a competitividade organizacional, especialmente em sistemas que dependem de múltiplos recursos interdependentes. Autores como Goldratt e Cox (2004) ressaltam que o desempenho global de um sistema produtivo é condicionado pelo seu recurso mais restritivo, princípio central da Teoria das Restrições (TOC). Para Slack, Brandon-Jones e Johnston (2020), o equilíbrio na utilização dos recursos é fundamental para garantir desempenho consistente em custo, qualidade e prazo. No contexto da empresa estudada, essa discussão ganha relevância prática, uma vez que a elevada capacidade instalada de máquinas contrasta com a



disponibilidade limitada dos moldes, criando um cenário propício à formação de gargalos produtivos.

Diante desse contexto, surge a seguinte questão de pesquisa: qual fator exerce maior influência sobre a eficiência operacional na produção de caixas térmicas — a disponibilidade de moldes ou a disponibilidade de máquinas? A partir dessa indagação, o presente trabalho busca avaliar, verificar, por meio de simulação de eventos discretos no software Arena®, como diferentes níveis de disponibilidade de moldes e máquinas influenciam a eficiência produtiva de uma fábrica, identificando o recurso restritivo e verificando se o aumento da disponibilidade dos moldes é capaz de elevar a produtividade e melhorar o desempenho operacional.

A simulação em ambiente controlado permite testar cenários operacionais, observar gargalos e analisar o impacto de cada variável sem interferir no processo real. Assim, o estudo pretende apoiar a tomada de decisão no Planejamento e Controle da Produção (PCP), contribuindo para a redução de perdas operacionais e a melhoria contínua da eficiência fabril.

2. Referencial Teórico

2.1. Eficiência Operacional, Disponibilidade De Recursos E Restrições Produtivas

A eficiência operacional em sistemas produtivos depende da capacidade de coordenar recursos interdependentes de forma a garantir estabilidade do fluxo e atendimento à demanda. Em ambientes industriais caracterizados por elevada variabilidade de produtos e compartilhamento de recursos, a ampliação de capacidade nem sempre resulta em ganhos produtivos, uma vez que o desempenho global do sistema é condicionado pela forma como esses recursos interagem ao longo do processo (Friederich & Lazarova-Molnar, 2024). Conforme destacam Shah e Ward (2007), a competitividade organizacional está diretamente relacionada à redução de interrupções, à minimização de esperas e à manutenção de um fluxo produtivo estável. De forma complementar, Rosenzweig, Roth e Dean (2003) argumentam que falhas na integração entre equipamentos, ferramentas e mão de obra comprometem o desempenho do sistema produtivo como um todo.

Nesse contexto, a disponibilidade de recursos produtivos assume papel central na análise da eficiência operacional. Em processos industriais, recursos físicos como máquinas e ferramentais exercem influência direta sobre o ritmo produtivo. Embora as máquinas representem a capacidade instalada do sistema, sua utilização efetiva depende da disponibilidade dos demais recursos necessários à execução das operações. Em indústrias de transformação plástica, os moldes constituem um tipo específico de ferramental e representam um recurso crítico, pois cada item produzido depende de um molde exclusivo.



Além disso, esses moldes são frequentemente compartilhados entre diferentes unidades fabris, o que torna sua disponibilidade limitada e variável ao longo do tempo, sendo afetada por cronogramas de uso, setups, manutenções e deslocamentos entre plantas produtivas (Friederich & Lazarova-Molnar, 2024).

A interdependência entre moldes e máquinas cria um cenário no qual a indisponibilidade de um único recurso pode interromper o fluxo produtivo, mesmo quando há capacidade instalada disponível nos demais. Nessas situações, a ociosidade das máquinas não decorre necessariamente de excesso de capacidade, mas da ausência do ferramental necessário à produção, resultando em filas, aumento do tempo de espera e perda de eficiência operacional. Essa dinâmica evidencia a importância de analisar os recursos de forma integrada, considerando não apenas sua capacidade nominal, mas sua disponibilidade efetiva ao longo do tempo.

A Teoria das Restrições (TOC) oferece uma estrutura conceitual consistente para a análise desse tipo de sistema produtivo, ao partir do princípio de que o desempenho global é determinado pelo recurso mais restritivo. Segundo Goldratt e Cox (2004), a restrição é o elemento que limita a vazão do sistema, de modo que intervenções realizadas em recursos não restritivos tendem a gerar impactos limitados sobre o desempenho global. Em ambientes industriais com recursos compartilhados, a restrição pode assumir caráter dinâmico, manifestando-se naquele recurso cuja indisponibilidade provoca interrupções no fluxo produtivo e ociosidade dos demais. Estudos como o de Ukey et al. (2025) demonstram que a aplicação da TOC, especialmente quando integrada a métodos quantitativos, contribui para a identificação mais precisa de gargalos e para o direcionamento de ações de melhoria mais eficazes.

2.2. Identificação De Gargalos Por Indicadores Operacionais e Simulação De Eventos Discretos

A mensuração do desempenho operacional é fundamental para diagnosticar o comportamento de sistemas produtivos e avaliar os impactos das restrições sobre o fluxo. Nesse sentido, o uso de indicadores adequados permite quantificar perdas, identificar desequilíbrios na utilização dos recursos e apoiar a tomada de decisão baseada em evidências (Ng Corrales et al., 2020).

Neste estudo, destaca-se o uso do indicador Overall Equipment Effectiveness (OEE), amplamente empregado para avaliar a eficiência global de sistemas produtivos. O OEE permite analisar de forma integrada as perdas associadas à indisponibilidade, ao desempenho e à qualidade, oferecendo subsídios relevantes para compreender como os recursos são efetivamente utilizados no processo produtivo (Muchiri & Pintelon, 2019). No contexto analisado, esse indicador assume especial relevância ao possibilitar a diferenciação entre perdas decorrentes da indisponibilidade de moldes e aquelas associadas à capacidade efetiva das máquinas, contribuindo para a identificação do recurso que condiciona o fluxo produtivo.

De forma complementar, a taxa de utilização dos recursos é empregada para avaliar a relação entre o tempo produtivo efetivo e o tempo total disponível. Em sistemas produtivos



caracterizados por recursos interdependentes, esse indicador evidencia situações em que a capacidade instalada permanece subutilizada em função da indisponibilidade de outros recursos críticos. Em processos de moldagem por injeção, nos quais moldes exclusivos condicionam a execução das operações, a análise da taxa de utilização permite identificar cenários em que a ociosidade das máquinas está associada à restrição imposta pelo ferramental disponível, e não à falta de demanda ou à baixa eficiência operacional (Slack, Brandon-Jones & Johnston, 2020).

Complementarmente à análise baseada em indicadores operacionais, a simulação de eventos discretos (Discrete Event Simulation – DES) amplia a compreensão do comportamento do sistema produtivo ao longo do tempo. Essa abordagem é particularmente adequada para sistemas industriais nos quais as mudanças ocorrem em eventos pontuais, como o início e o término de operações, a chegada de ordens de produção ou a indisponibilidade de recursos. Ao representar de forma dinâmica a interação entre recursos, entidades e restrições, a simulação permite avaliar o impacto de variações na disponibilidade dos recursos e testar cenários operacionais alternativos em ambiente controlado, sem interferir no processo produtivo real (Akpan & Etti, 2025).

Estudos recentes reforçam a aplicabilidade da DES na análise de sistemas produtivos caracterizados por alta variabilidade e compartilhamento de recursos. Piacentini et al. (2023) demonstram que a aplicação da simulação em indústrias de transformação plástica possibilita identificar restrições, comparar cenários produtivos e apoiar decisões relacionadas à capacidade e ao fluxo de produção.

A integração entre a simulação de eventos discretos e os princípios da Teoria das Restrições contribui para uma análise mais consistente do desempenho produtivo, ao direcionar a atenção para o recurso que efetivamente condiciona o fluxo do sistema. Conforme demonstram Sabbadini, Gonçalves e Oliveira (2006), essa abordagem possibilita avaliar o impacto de intervenções direcionadas ao recurso restritivo e evitar investimentos em recursos não limitantes, favorecendo melhorias mais consistentes na eficiência operacional.

3. METODOLOGIA

Esta pesquisa caracteriza-se como um estudo de caso aplicado, de abordagem exploratória e quantitativa, desenvolvido com o objetivo de analisar o comportamento de um sistema produtivo real em uma indústria de transformação plástica, com foco na identificação do recurso restritivo associado à disponibilidade de moldes e máquinas. A opção pelo estudo de caso justifica-se pela necessidade de compreender o fenômeno investigado em seu contexto organizacional específico, considerando suas particularidades operacionais e produtivas (Ullah et al., 2025)

A condução do estudo seguiu um conjunto estruturado de etapas metodológicas, desde o mapeamento do processo produtivo até a análise comparativa de cenários simulados e a proposição de ações de melhoria. Essa organização metodológica é compatível com



abordagens aplicadas à análise de sistemas produtivos e à avaliação de restrições operacionais por meio de métodos quantitativos, conforme discutido por Ukey et al. (2025). Essas etapas estão sintetizadas na Tabela de Etapas Metodológicas, que organiza a sequência lógica adotada na pesquisa e assegura a coerência entre coleta de dados, modelagem, simulação e análise dos resultados.

Tabela 1 - Etapas metodológicas do estudo

Etapa	Descrição das Atividades
1. Mapeamento do Processo	Mapeamento do processo produtivo atual, com identificação das etapas, fluxos operacionais, tempos de ciclo e recursos envolvidos.
2. Modelagem Computacional	Construção do modelo de simulação no software Arena®, representando entidades, recursos, filas, regras operacionais e lógica de alocação dos moldes.
3. Validação do Modelo	Validação do modelo por meio da comparação entre os resultados simulados e os dados reais de produção, verificando a aderência dos volumes produzidos e tempos médios do processo.
4. Elaboração de Cenários	Definição e modelagem de três cenários: cenário base (situação atual), cenário com aumento da disponibilidade de máquinas e cenário com ampliação da disponibilidade dos moldes.
5. Simulação e Coleta de Dados	Execução das simulações com múltiplas repetições e coleta dos dados necessários para o cálculo dos indicadores de desempenho.
6. Análise Comparativa	Análise comparativa dos cenários simulados com base nos indicadores de volume produzido, taxa de utilização dos recursos e eficiência operacional.
7. Proposição de Ações de Melhoria	Proposição de ações de melhoria direcionadas ao recurso restritivo identificado, com base nos resultados obtidos por simulação.

Fonte: Elaborado pela autora (2025)

Como método de investigação, foi empregada a Simulação de Eventos Discretos (Discrete Event Simulation – DES), utilizando-se o software Arena®, em sua versão acadêmica. A escolha pela DES deve-se à natureza do sistema analisado, no qual as mudanças ocorrem em eventos pontuais — como início e término de operações, chegada de ordens de produção, falhas e indisponibilidade de recursos — características típicas de processos de moldagem por injeção plástica. O Arena® foi selecionado por possibilitar a representação visual e estruturada do fluxo produtivo, das filas e das regras operacionais, sendo amplamente empregado em estudos aplicados na área de manufatura (Piacentini et al., 2023).

O objeto de estudo compreende a fabricação de itens intermediários destinados à montagem de caixas térmicas, produzidos em máquinas injetoras termoplásticas. Para a construção do modelo de simulação, foram utilizados dados reais referentes a um mês de produção, obtidos a partir de registros internos da empresa e complementados por observação direta do processo produtivo e anotações de chão de fábrica. Esses dados incluíram tempos de ciclo por item, volumes produzidos, disponibilidade de máquinas e moldes, além de registros de falhas e manutenções.

Adicionalmente, foram realizadas entrevistas informais de caráter exploratório com colaboradores envolvidos na operação e no planejamento da produção, com o objetivo de levantar informações práticas relevantes para a parametrização do modelo. As entrevistas abordaram aspectos como critérios de priorização das ordens, alocação dos moldes entre



linhas e unidades fabris, tempos médios de ciclo por item, frequência de falhas e manutenções corretivas de máquinas e moldes, bem como volumes médios mensais produzidos de itens estratégicos, como a caixa térmica de 12 litros. Também foram discutidos aspectos relacionados à logística de circulação dos moldes entre unidades, permitindo representar de forma mais fiel as oscilações internas do sistema produtivo.

O modelo computacional foi estruturado para representar o fluxo produtivo real dos itens analisados, contemplando entidades, recursos, filas e regras de decisão. As máquinas injetoras foram modeladas de forma agregada, considerando a capacidade total disponível na unidade, uma vez que o foco da análise está na interação entre capacidade instalada e disponibilidade de moldes, e não na comparação individual entre equipamentos. Os moldes foram modelados como recursos críticos, com regras específicas de alocação e agendas de disponibilidade que refletem sua circulação entre diferentes unidades fabris.

A lógica de filas adotada no modelo considerou a prática observada no nível de planejamento da produção, na qual as ordens são previamente priorizadas antes de sua liberação para o chão de fábrica. No escopo deste estudo, a análise concentrou-se na produção da caixa térmica de 12 litros, classificada pela empresa como um item prioritário. Assim, uma vez selecionadas as ordens desse produto para execução, não há diferenciação adicional de prioridade entre elas no nível operacional. Dessa forma, a regra de atendimento das filas foi modelada segundo o critério FIFO (First In, First Out), por ser compatível com o comportamento real do sistema para o conjunto de ordens analisado e adequado ao objetivo da simulação.

Os tempos de processamento foram representados por meio de distribuições de probabilidade ajustadas a partir de dados históricos de produção. As falhas de máquinas e os tempos de reparo foram modelados com base em registros reais, enquanto a indisponibilidade dos moldes foi associada à frequência de manutenção corretiva e à sua alocação em outras unidades.

Para assegurar maior robustez estatística e reduzir os efeitos da variabilidade inerente aos modelos de simulação, cada cenário foi executado em 10 repetições independentes, com horizonte de simulação de 30 dias, correspondente ao período mensal analisado. Foi adotado um período de aquecimento (warm-up) inicial, definido a partir da estabilização dos principais indicadores de desempenho, cujos dados foram desconsiderados na análise final. As repetições permitiram capturar as flutuações decorrentes da aleatoriedade dos tempos de processo e da disponibilidade dos recursos, possibilitando a obtenção de valores médios mais estáveis e representativos, conforme recomendado em estudos de simulação aplicados (Troncoso-Palacio et al., 2020).

As variáveis coletadas incluíram volume produzido por item, taxa de utilização dos recursos, tempos médios de espera em fila e indicadores de eficiência operacional. Os resultados consolidados foram calculados com base na média das repetições e utilizados para a comparação entre os cenários simulados.

A validação do modelo foi realizada por meio da comparação entre os resultados simulados e os dados reais de produção, especialmente em relação aos volumes produzidos e aos tempos médios de processamento. A diferença observada foi da ordem de 5%, valor



considerado aceitável para estudos de simulação dessa natureza, assegurando que o modelo representa de forma satisfatória a realidade operacional da empresa (Piacentini et al., 2023).

Com o modelo validado, foram elaborados três cenários de simulação: um cenário base, representando a condição atual do sistema; um cenário com aumento da disponibilidade de máquinas; e um cenário com ampliação da disponibilidade dos moldes. A definição desses cenários teve como objetivo avaliar o impacto isolado de cada recurso sobre o desempenho produtivo e identificar aquele que efetivamente condiciona o fluxo do sistema, em consonância com análises baseadas na Teoria das Restrições (Ukey et al., 2025).

Por fim, os resultados obtidos permitiram a realização de uma análise comparativa entre os cenários, subsidiando a proposição de ações de melhoria direcionadas ao recurso restritivo identificado. Essa abordagem metodológica possibilitou avaliar, de forma estruturada e baseada em evidências, alternativas de decisão relacionadas ao planejamento e à alocação de recursos no contexto da empresa estudada.

4 Desenvolvimento

4.1 Mapeamento Do Processo

O mapeamento do processo realizado neste estudo tem por finalidade estruturar o fluxo produtivo considerado na simulação computacional, delimitando o processo de injeção plástica dos componentes da caixa térmica de 12 litros. O mapeamento abrange as etapas operacionais diretamente relacionadas à fabricação desses componentes, desde a liberação da ordem de produção até a disponibilização dos itens para a etapa de montagem final.

O processo inicia-se com a liberação da ordem de produção dos componentes e a verificação da disponibilidade do molde específico associado a cada item. Confirmada a disponibilidade do ferramental, o molde é alocado a uma máquina injetora apta à execução da operação, conforme as condições operacionais observadas no sistema produtivo.

Na sequência, ocorre a operação de injeção plástica, na qual o material termoplástico é processado e conformado no molde, resultando no componente correspondente. Finalizado o ciclo de injeção, os itens são submetidos a uma verificação operacional básica e encaminhados ao estoque intermediário.

O estoque intermediário funciona como um ponto de acumulação temporária dos componentes injetados, os quais permanecem armazenados até que estejam disponíveis, de forma simultânea, os quatro tipos de componentes necessários à composição da caixa térmica de 12 litros. Uma vez formado o conjunto completo, os componentes retornam ao fluxo produtivo para a etapa de montagem, na qual ocorre a constituição do produto final.

O mapeamento considera como recursos do processo as máquinas injetoras e os moldes específicos associados a cada componente, adotando um nível de detalhamento compatível com os objetivos da simulação. O escopo definido assegura a aderência entre o

processo produtivo observado e o modelo computacional desenvolvido, servindo de base para a análise dos cenários simulados.

A Figura 1 apresenta o mapeamento do processo produtivo considerado no estudo, evidenciando as etapas operacionais e os recursos envolvidos.

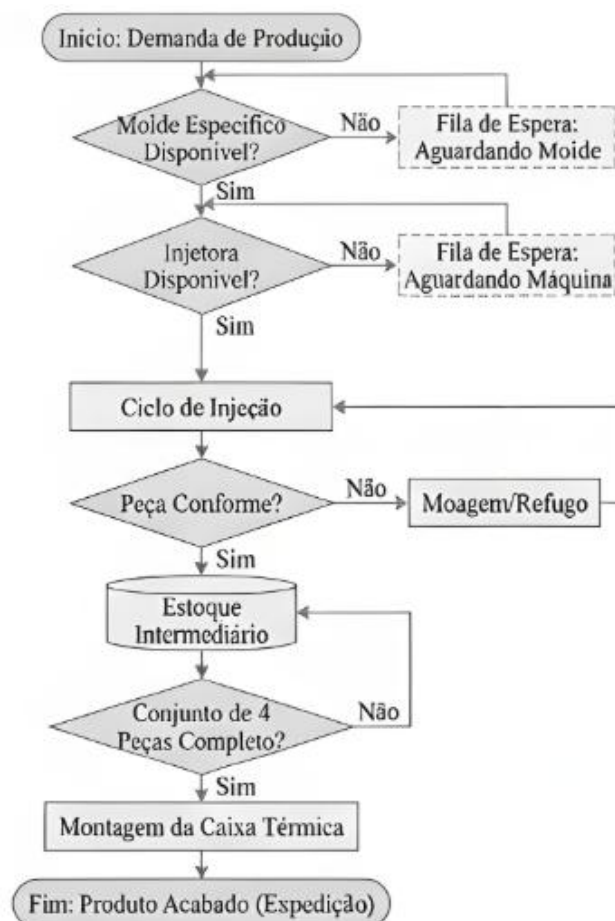


Figura 1 - Fluxograma do processo produtivo da caixa térmica
Fonte: Elaborado pela autora (2025)

4.2 Modelagem Computacional E Validação Do Modelo

A modelagem computacional do sistema produtivo foi desenvolvida por meio de Simulação de Eventos Discretos, utilizando o software Arena®, com o objetivo de representar o processo de injeção plástica dos componentes que compõem a caixa térmica. O modelo foi construído a partir do fluxo produtivo descrito no mapeamento do processo, considerando exclusivamente as operações associadas à fabricação das peças alça, tampa, corpo interno e corpo externo.



A estrutura do modelo foi composta pelos módulos Create, Assign, Process, Batch e Dispose. O módulo Create foi responsável pela geração das ordens de produção, cuja lógica de chegada foi configurada com intervalos entre 45 e 60 minutos, representando o padrão observado no sistema real. Os módulos Assign atribuíram às entidades os atributos necessários à sua diferenciação ao longo do sistema, incluindo o tipo de componente, a quantidade por ordem e a identificação do molde correspondente.

Os itens foram classificados por meio de um código numérico, no qual o valor “0” representa itens adicionais produzidos pela unidade e os valores de “1” a “4” correspondem, respectivamente, aos componentes alça, tampa, corpo interno e corpo externo da caixa térmica. O item classificado como tipo “0” não participa da formação do produto final, sendo incluído exclusivamente para representar a carga real sobre a capacidade produtiva agregada das máquinas. A distribuição percentual das ordens entre os diferentes tipos de itens foi modelada por meio de uma distribuição discreta empírica (função DISC do Arena®).

As entidades do modelo representam as ordens de produção liberadas conforme essa lógica de chegada e distribuição, carregando atributos que asseguram sua correta associação aos tempos de ciclo, quantidades por ordem e recursos requeridos para o processamento. A capacidade produtiva foi representada de forma agregada, considerando um total de 3.082 horas produtivas semanais, correspondentes a 23 máquinas injetoras, conforme os dados reais de operação da unidade analisada.

Cada componente foi vinculado a um molde exclusivo, configurado como recurso necessário à execução da operação de injeção. A produção é condicionada à disponibilidade simultânea do molde correspondente e da capacidade de máquina. Após o processamento, os componentes seguem fluxos individualizados, sendo encaminhados ao estoque intermediário, conforme descrito no mapeamento do processo. Nesse ponto, os itens permanecem aguardando até que estejam disponíveis, simultaneamente, os quatro tipos necessários à formação de um conjunto completo. Uma vez atendida essa condição, o módulo Batch realiza a combinação das entidades, viabilizando a etapa de montagem final, cujo produto acabado é encaminhado ao estoque por meio do módulo Dispose.

As quantidades por ordem foram definidas de forma proporcional à demanda mensal planejada. Foram considerados 1.000 pallets por ordem para cada um dos componentes alça, tampa, corpo interno e corpo externo, enquanto o item classificado como tipo “0” foi configurado com 10.000 pallets por ordem, com o objetivo de evitar a geração de ordens incompletas ao final do horizonte de simulação e de reproduzir a lógica de planejamento praticada no sistema real.

A disponibilidade dos recursos foi controlada por meio de agendas do tipo Schedule. Para as máquinas injetoras, foi definida uma agenda semanal que representa as horas produtivas reais, considerando operação contínua nos dias úteis e redução da carga horária nos finais de semana. Para os moldes, foi criada uma agenda específica que reflete sua condição de compartilhamento entre unidades fabris, considerando uma disponibilidade média de dez dias por mês, equivalente a aproximadamente um terço do horizonte mensal.

As falhas e manutenções foram incorporadas ao modelo por meio de distribuições de probabilidade ajustadas a partir de dados históricos. Para as máquinas, utilizou-se uma

distribuição exponencial para representar o tempo médio entre falhas, combinada a uma distribuição triangular para o tempo de reparo. Para os moldes, a ocorrência de falhas foi modelada em função do número de ciclos até a necessidade de manutenção, associada a uma distribuição uniforme para o tempo de reparo. Os tempos de setup não foram considerados, uma vez que a simulação foi iniciada com os moldes já alocados às máquinas, e os setups de itens fora do escopo foram desconsiderados por não impactarem o fluxo principal analisado.

Os parâmetros numéricos, distribuições de probabilidade e configurações adotadas na construção do modelo encontram-se consolidados na Tabela 2, apresentada na sequência, assegurando a rastreabilidade das escolhas metodológicas e consistência à modelagem realizada.

Tabela 1 - Parâmetros utilizados na modelagem do cenário base

Indicador	Recurso	Valor	Descrição
Chegada das ordens	Ordem	Entre 45 e 60 min	Entre 1 e 300 pallets por ordem
Quantidade por pallets	Item	TIPO 0 = 10 mil TIPO 1 = 1 mil TIPO 2 = 1 mil TIPO 3 = 1 mil TIPO 4 = 1 mil	Tipos 1 a 4 com valores padronizados para análise de saída do produto final Tipo 0 utilizado para fins de integrar análise de capacidade produtiva agregada
Porcentagem das ordens	Item	TIPO 0 = 12% TIPO 1 = 22% TIPO 2 = 22% TIPO 3 = 22% TIPO 4 = 22%	Modelada através de uma distribuição de probabilidade discreta empírica (função DISC do Arena), utilizando o Método da Transformada Inversa.
Tempos de ciclo	Alça	48s	Molde 4 cavidades
	Tampa	35s	Molde 2 cavidades
	Corpo interno	25s	Molde 1 cavidades
	Corpo externo	25s	Molde 1 cavidades
Capacidade produtiva agregada	Máquinas	134 horas/semana x 23 máquinas = 3082 horas/semana	Horas produtivas referente a 23 máquinas disponíveis
Disponibilidade de Moldes	Moldes em geral	10 dias por mês	Representa a disponibilidade real gerada pelo compartilhamento do molde
Parada de manutenção	Máquina	Falha - EXPO (40)	Distribuição exponencial com média de 40 horas, representando o tempo médio entre falhas da máquina.
		Tempo de Reparo - TRIA (1, 3, 5)	Distribuição triangular com mínimo de 1 h, moda de 3 h e máximo de 5 h, utilizada para representar a variação do tempo de reparo.



Molde	Falha - TRIA (5000, 15000, 75000)	Distribuição triangular baseada na contagem de ciclos, com mínimo de 5.000 ciclos, valor mais provável de 15.000 ciclos e máximo de 75.000 ciclos até a ocorrência de falha do molde.
	Tempo de Reparo - UNIF (2, 8)	Tempo de reparo uniforme entre 2 e 8 horas, representando que qualquer duração dentro desse intervalo possui a mesma probabilidade.

Fonte: Elaborado pela autora (2025)

4.3 Elaboração de Cenários

Com o modelo validado, foram definidos cenários alternativos de simulação a partir das condições reais do sistema produtivo, considerando exclusivamente variações pontuais na disponibilidade dos recursos, de modo a isolar o efeito de cada fator sobre o desempenho operacional.

O Cenário Base representa a condição atual de operação da unidade, com 3.082 horas produtivas semanais de máquinas e disponibilidade média de moldes de 10 dias por mês. A partir desse cenário de referência, foram elaborados dois cenários adicionais. O Cenário 2 avalia o impacto do aumento da disponibilidade de máquinas, por meio da ampliação da jornada semanal até o sábado em regime contínuo, elevando a capacidade para 3.312 horas semanais, mantendo inalterada a disponibilidade dos moldes. Já o Cenário 3 considera o aumento da disponibilidade física dos moldes, ampliando sua permanência na unidade de 10 para 15 dias por mês, por meio da reprogramação do rodízio entre as unidades fabris, sem alteração na capacidade de máquina.

Esses cenários foram definidos de forma a permitir uma comparação direta e controlada, possibilitando identificar qual recurso exerce maior influência sobre o desempenho do sistema produtivo. As principais características de cada cenário encontram-se sintetizadas na Tabela 3.

Tabela 3 – Cenários de Análise

	Descrição	Máquina	Molde	Implementação
Cenário 1	Cenário atual (referência)	3082 horas/semana	10 dias/mês	Parâmetros conforme tabela de cenário real.
Cenário 2	Aumento da disponibilidade de máquina	3312 horas/semana	10 dias/mês	Aumento da escala de horário de sábado de 14hrs para 24hrs
Cenário 3	Aumento da disponibilidade física do molde	3082 horas/semana	15 dias/mês	Ampliação do ciclo de rodízio para 1,5 mês para permitir 15 dias por filial.

Fonte: Elaborado pela autora (2025)



4.4 Simulação e Coleta de Dados

As simulações foram executadas considerando um horizonte mensal, compatível com o ciclo de planejamento da produção da empresa e com a lógica de liberação das ordens de produção adotada no modelo. Para cada cenário analisado, o modelo foi executado de forma independente, assegurando condições equivalentes para fins de comparação.

Durante a execução das simulações, foram coletados indicadores de desempenho operacional previamente definidos, com destaque para a produção total, a taxa de utilização dos recursos e o indicador Overall Equipment Effectiveness (OEE). A adoção do OEE permitiu avaliar o desempenho do sistema de forma integrada, considerando simultaneamente os efeitos da disponibilidade dos recursos e do ritmo efetivo de produção.

No contexto do sistema analisado, a interpretação dos componentes do OEE requer atenção às características estruturais do processo produtivo. O componente de disponibilidade é diretamente influenciado pela condição de compartilhamento dos moldes entre unidades fabris, uma vez que períodos de indisponibilidade do ferramental interrompem a produção mesmo na presença de capacidade de máquina disponível. Dessa forma, valores reduzidos de disponibilidade não indicam falhas operacionais ou paradas não planejadas das máquinas, mas refletem restrições físicas inerentes à organização do sistema produtivo.

De modo complementar, o componente de desempenho do OEE é impactado pela intermitência do fluxo produtivo decorrente dessas mesmas restrições. Embora as máquinas injetoras apresentem capacidade nominal elevada, o ritmo efetivo de produção é condicionado pela disponibilidade dos moldes, impedindo a operação contínua no ritmo teórico máximo. Assim, valores reduzidos de desempenho não estão associados à baixa eficiência dos equipamentos, mas à fragmentação dos ciclos produtivos imposta por restrições externas ao equipamento.

A análise conjunta desses componentes permite compreender que os valores observados do OEE refletem o comportamento sistêmico do processo, no qual a capacidade instalada das máquinas não é plenamente explorada em função da indisponibilidade de recursos críticos. Para complementar essa análise, a taxa de utilização das máquinas foi coletada de forma independente, possibilitando distinguir situações de ociosidade induzida por restrições estruturais daquelas relacionadas a limitações próprias do equipamento ou do processo.

Os valores obtidos para os indicadores de desempenho em cada cenário foram consolidados em tabelas comparativas, apresentadas na Tabela 4, que fundamentam a análise desenvolvida.



Tabela 4 – Indicadores operacionais

Indicador	Cenário 1 – Base	Cenário 2 – Aumento de Máquina	Cenário 3 – Aumento de Molde
Quantidade produtiva	36.000 unidades	36.000 unidades	46.000 unidades
Taxa de Utilização das Máquinas (%)	42,83%	42,83%	44,34%
Taxa de Utilização dos Moldes (%)			
Alça	51%	51%	43%
Tampa	75%	75%	62%
Corpo interno	100%	100%	89%
Corpo externo	100%	100%	89%
Disponibilidade (OEE – %)	42,83%	42,83%	44,34%
Desempenho (OEE – %)	22%	22%	27%
Qualidade (OEE – %)	97,40%	97,40%	95,36%
OEE Global (%)	8,96%	8,96%	11,28%

Fonte: Elaborado pela autora (2025)

4.5 Análise Comparativa dos Resultados

A análise dos resultados obtidos nas simulações permitiu compreender, de maneira abrangente, o comportamento do sistema produtivo frente às variações de disponibilidade de moldes e máquinas. Os três cenários apresentados demonstram que o gargalo predominante da operação está associado à restrição imposta pelos moldes, cujo período limitado de permanência na unidade fabril condiciona o ritmo produtivo e reduz a flexibilidade operacional da F05. Tal constatação reforça a relevância do ferramental como recurso crítico, especialmente em um ambiente caracterizado pela interdependência entre múltiplos itens e pela necessidade de sincronização entre etapas, conforme discutido por Troncoso-Palacio et al. (2020).

Nos cenários em que a disponibilidade das máquinas foi ampliada, observou-se que a produtividade permaneceu inalterada em 36.000 unidades, o que evidencia que o aumento de capacidade de máquina, quando analisado isoladamente, não se traduz automaticamente em elevação do throughput. A taxa de utilização das máquinas — constante em 42,83% nos Cenários 1 e 2 — confirma que as injetoras operavam abaixo de sua capacidade nominal, permanecendo ociosas em diversos momentos devido à indisponibilidade dos moldes. Esse comportamento está alinhado ao princípio central da Teoria das Restrições (TOC), segundo o qual a expansão de recursos não restritivos não gera impacto significativo no desempenho global do sistema, uma vez que a produção permanece limitada pelo recurso mais escasso.



Conforme destacam Ukey et al. (2025), a restrição não necessariamente corresponde ao equipamento mais utilizado, mas sim ao recurso cuja ausência impede o fluxo de avançar.

O cenário em que a disponibilidade dos moldes foi ampliada apresentou resultados substancialmente distintos. O aumento da permanência dos ferramentais gerou uma elevação expressiva na produção final, que atingiu 46.000 unidades, representando um acréscimo superior a 27% em relação aos cenários anteriores. Essa variação ocorreu sem qualquer modificação no número de máquinas ou na carga horária disponível, o que confirma que o aumento da disponibilidade dos moldes aliviou o gargalo predominante, permitindo maior fluidez operacional. A taxa de utilização das máquinas também cresceu para 44,34%, refletindo que, ao se ampliar o acesso aos moldes, as injetoras conseguem operar de forma mais contínua, reduzindo tempos de espera e melhorando o desempenho global do sistema.

Esse comportamento reforça a visão apresentada por Skoogh et al. (2023), que demonstram que, em sistemas que dependem de recursos compartilhados ou de alta especificidade — como os moldes de injeção plástica —, a restrição se manifesta de maneira dinâmica, afetando diretamente o acúmulo de filas e a ociosidade dos demais recursos. No caso estudado, os moldes de corpo interno e corpo externo, cada um com apenas uma cavidade, alcançaram níveis máximos de utilização nos Cenários 1 e 2, indicando saturação e impossibilidade de atender à demanda acumulada. Quando sua disponibilidade foi ampliada, a utilização caiu levemente, mas o volume total produzido aumentou, demonstrando que a restrição foi parcialmente aliviada, permitindo que outros itens também avançassem no fluxo produtivo.

O comportamento dos indicadores de OEE reforça essa interpretação. A disponibilidade e o desempenho permaneceram estáveis nos dois primeiros cenários, mas apresentaram crescimento no cenário com maior disponibilidade de molde, elevando o OEE global de 8,96% para 11,28%. Esse aumento, embora aparentemente modesto, representa uma variação estrutural significativa em sistemas de manufatura complexos, pois revela a redução de tempos improdutivos e o melhor aproveitamento dos períodos ativos de operação. Em consonância com Skoogh et al. (2023), a maior regularidade do processo tende a elevar a confiabilidade operacional e reduzir perdas sistêmicas associadas a esperas e ociosidade.

Em síntese, os resultados demonstram que a produtividade da F05 não está limitada pela capacidade instalada de máquinas, mas pela disponibilidade dos moldes, especialmente aqueles de menor número de cavidades. O comportamento observado na simulação confirma os pressupostos da TOC: ao priorizar o recurso restritivo — neste caso, aumentando a permanência física dos moldes na unidade — o sistema como um todo apresenta melhora significativa no throughput, na utilização de máquinas e na estabilidade operacional. A expansão de recursos não restritivos, como a ampliação da carga horária das injetoras, mostrou-se insuficiente para promover ganhos produtivos, corroborando o entendimento de que a eficiência global depende da coordenação entre disponibilidade física, fluxo produtivo e capacidade instalada.

Dessa forma, os achados obtidos por meio da simulação confirmam a hipótese central deste estudo e evidenciam o papel determinante da disponibilidade de moldes no desempenho da unidade fabril analisada. Além disso, reforçam a utilidade da Simulação de



Eventos Discretos como ferramenta para diagnosticar restrições, comparar alternativas operacionais e suportar a tomada de decisão no planejamento e controle da produção.

4.6 Proposição de Ações de Melhoria

Com base nos resultados obtidos e nas evidências identificadas nos cenários simulados, algumas ações práticas podem ser implementadas pela empresa com o objetivo de elevar a eficiência operacional da F05 e reduzir a dependência estrutural dos moldes enquanto recurso restritivo.

Primeiramente, recomenda-se a revisão do sistema de rodízio dos moldes entre as unidades fabris, buscando reduzir o período de indisponibilidade observado no cenário atual. O aumento da permanência dos moldes na unidade — ainda que de forma moderada — demonstrou capacidade de elevar significativamente o throughput, indicando que ajustes logísticos ou redistribuições planejadas podem contribuir para uma operação mais estável.

Além disso, a empresa pode adotar estratégias de nivelamento produtivo e sincronização das demandas internas, com apoio do PCP, de modo a reduzir conflitos de agenda entre os setores que utilizam os mesmos moldes. A integração entre planejamento e execução, conforme argumentado por Tubino (2022), tende a reduzir ociosidade acidental e promover maior aderência entre demanda e capacidade.

Também se recomenda avaliação econômica para a possível aquisição de moldes adicionais para os itens classificados como restritivos — especialmente corpo interno e corpo externo — que atingiram 100% de utilização nos cenários de referência. Como demonstrado nos resultados da simulação, a inserção de maior disponibilidade desse ferramental possui impacto direto sobre o volume produzido, podendo gerar retorno significativo mesmo com investimentos modesto quando comparado ao custo operacional de atrasos e perdas de produtividade.

Por fim, recomenda-se que a empresa mantenha o uso da Simulação de Eventos Discretos como ferramenta de apoio ao PCP, ampliando sua incorporação nos processos decisórios. A modelagem contínua de cenários, a cada revisão do Plano Mestre de Produção, permitiria antecipar restrições futuras, avaliar alternativas de escala operacional e promover uma gestão proativa da capacidade produtiva.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente estudo buscou responder à seguinte pergunta, utilizando a Simulação de Eventos Discretos como instrumento de análise: qual fator exerce maior influência sobre o desempenho produtivo da Fábrica 05 — a disponibilidade dos moldes ou a disponibilidade das máquinas? A abordagem permitiu reproduzir com fidelidade a dinâmica operacional do sistema e avaliar, de forma rigorosa, o efeito de diferentes níveis de disponibilidade desses



recursos sobre o fluxo produtivo. A partir dos cenários testados, verificou-se que a disponibilidade dos moldes exerce papel decisivo na capacidade de produção, configurando-se como o principal fator limitante da operação. Essa constatação possibilitou responder à questão de pesquisa e confirmou a pertinência de analisar os recursos sob a ótica da restrição predominante.

A interpretação dos resultados dialoga diretamente com os fundamentos teóricos adotados. A identificação dos moldes como recurso restritivo corrobora os princípios da Teoria das Restrições, que afirma que o desempenho global de um sistema é condicionado pelo elemento que limita sua vazão. Do mesmo modo, os efeitos observados reforçam a importância da coordenação entre recursos críticos, em abordagens orientadas à estabilidade do fluxo.. A simulação mostrou-se particularmente útil nesse processo, ao permitir visualizar de maneira clara como ajustes relativamente simples na disponibilidade dos moldes são capazes de produzir melhorias significativas no rendimento do sistema.

Os resultados indicaram que o aumento da disponibilidade dos moldes resultou em elevação do volume produzido e do OEE global, enquanto a ampliação da disponibilidade de máquinas não gerou variações relevantes no throughput do sistema. Em termos relativos, os cenários com maior permanência dos moldes apresentaram aumento percentual na produção, ao passo que a utilização das máquinas permaneceu inferior à sua capacidade instalada, evidenciando a presença de ociosidade induzida. Esses achados indicam que a capacidade adicional de máquinas não se traduz em ganhos de produção quando o recurso restritivo permanece inalterado, fornecendo subsídios objetivos para a tomada de decisão no PCP e para o direcionamento de ações focadas no recurso limitante.

Embora os resultados sejam consistentes, o estudo apresenta limitações inerentes ao processo de modelagem. A simulação foi desenvolvida na versão acadêmica do Arena®, que possui restrições quanto ao número de entidades e à complexidade do modelo, limitando a incorporação de camadas adicionais de detalhamento, como variações sazonais de demanda, sequências completas de setup, trocas de cor ou múltiplos períodos de produção. Apesar de o modelo ter considerado falhas e reparos, aspectos mais específicos ligados aos padrões reais de manutenção das máquinas e dos moldes — como frequências diferenciadas, causas predominantes ou interações entre reparos e disponibilidade não foram aprofundadas, uma vez que extrapolariam o escopo definido prioritariamente. Optou-se por representar o sistema com foco na disponibilidade dos recursos críticos, o que implicou simplificações necessárias para manter a estabilidade do modelo. Esses fatores, porém, não comprometem a validade dos resultados, mas indicam caminhos de aprofundamento.

Com base nessas considerações, estudos futuros podem explorar modelos mais abrangentes, incorporando de maneira mais detalhada os dados de manutenção corretiva e preventiva, políticas alternativas de rodízio de moldes, variações de mix produtivo ao longo de diversos meses, análises combinadas de setup e logística interna ou a integração da simulação com métodos de otimização. Investigações que envolvam versões completas do software também podem ampliar o espectro de experimentações e apoiar, de forma ainda mais ampla, o processo decisório da organização.

Em síntese, o trabalho evidenciou a centralidade dos moldes para o desempenho produtivo da F05, demonstrou a utilidade da simulação como instrumento analítico e contribuiu para a compreensão das restrições que condicionam o fluxo industrial. Os



resultados oferecem suporte técnico para ações gerenciais e reforçam a importância de decisões orientadas pelo recurso restritivo no âmbito da melhoria contínua.

Referências

AKPAN, I. J.; ETTI, G. E. Simulation everywhere: An evolutionary expansion of discrete-event modeling and simulation research and practice. arXiv, 2025. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2506.05698>

CHANG, H.-J. Kicking away the ladder: development strategy in historical perspective. London: Anthem Press, 2002.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA (CNI). A importância da indústria para o Brasil. 2025. Disponível em: <https://www.portaldaindustria.com.br/estatisticas/industry-importance/>. Acesso em: 10/05/2025.

FRIEDERICH, Jonas; LAZAROVA-MOLNAR, Sanja. Reliability assessment of manufacturing systems: a comprehensive overview, challenges and opportunities. Journal of Manufacturing Systems, v. 72, p. 38–58, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2023.11.001>

GOLDRATT, E. M.; COX, J. A Meta: um processo de aprimoramento contínuo. 3. ed. Great Barrington, MA: North River Press, 2004.

SABBADINI, FRANCISCO; GONÇALVES, ANTÔNIO AUGUSTO; DE OLIVEIRA, MÁRIO JORGE F. Gestão da capacidade de atendimento e simulação computacional para a melhoria na alocação de recursos e no nível de serviço em hospitais. artigo apresentado no III SEGET–Simpósio de Excelência em Gestão e Tecnologia, Resende, RJ, p. 16-18, 2006. Acesso em: https://www.aedb.br/seget/arquivos/artigos06/22_gecap.pdf

KALDOR, N. Strategic factors in economic development. Ithaca: Cornell University Press, 1967.

MUCHIRI, P.; PINTELON, L. Performance measurement using overall equipment effectiveness (OEE): literature review and practical application discussion. International Journal of Production Research, 46(13), 3517–3535. DOI: <https://doi.org/10.1080/00207540601142645>

NG CORRALES, LISBETH DEL CARMEN; LAMBÁN, MARÍA PILAR; HERNÁNDEZ KORNER, MÁRIO ENRIQUE; ROYO, JESÚS. Eficácia global do equipamento: revisão sistemática da literatura e visão geral de diferentes abordagens. Applied Sciences, v. 10, n. 18, p. 6469, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/app10186469>

PIACENTINI, C. F.; GAUSS, L.; MORANDI, M. I. W. M.; LACERDA, D. P. Utilização da simulação computacional por eventos discretos e otimização para a programação da produção em uma empresa da indústria de plásticos. Revista Produção Online, v. 22, n. 1, p. 2510–2545, 2023. DOI: <https://doi.org/10.14488/1676-1901.v22i1.4597>

ROSENZWEIG, E. D.; ROTH, A. V.; DEAN JR., J. W. The influence of an integration strategy on competitive capabilities and business performance. Journal of Operations Management, v. 21, n. 4, p. 437–456, 2003. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0272-6963\(03\)00037-8](https://doi.org/10.1016/S0272-6963(03)00037-8)

SKOOGH, A., THÜRER, M., SUBRAMANIYAN, M., MATTA, A., & ROSER, C. (2023). Detecção de gargalos de produtividade na manufatura: uma revisão sistemática da literatura



sobre métodos e modos de operacionalização. *Production & Manufacturing Research*, 11 (1).
<https://doi.org/10.1080/21693277.2023.2283031>

SLACK, N.; BRANDON-JONES, A.; JOHNSTON, R. *Operations management*. 9. ed. Harlow: Pearson Education, 2020.

TRONCOSO, A.; SANCHEZ, A.; GONZALEZ, J. Discrete events simulation method for analyze cycle time: a case study in the plastics industry sector. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, v. 844, p. 012063, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/844/1/01206>

TUBINO, D. F. *Planejamento e controle da produção*. São Paulo: Atlas, 2022.

UKEY, KAMAL; CHINTA, LIMBADRI; MAJUMDER, HIMADRI; PATIL, DIPAK S.; MITKARI, SANJAY; SAHU, ANIL R.; DHUTEKAR, PRASHANT K. Implementation of the theory of constraints (TOC) for a furniture manufacturing-based organization. *Engineering Proceedings*, v. 114, n. 1, p. 17, 2025. DOI: <https://doi.org/10.3390/engproc2025114017>

ULLAH, ASIF; YOUNAS, MUHAMMAD; SAHARUDIN, MOHD SHAHNEEL. Transforming manufacturing quality management with cognitive twins: a data-driven, predictive approach to real-time optimization of quality. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, v. 9, n. 3, p. 79, 2025. DOI: <https://doi.org/10.3390/jmmp9030079>