

Suposições e Simplificações em Simulação de Eventos Discretos: Aplicação em uma linha de usinagem

Bruno Garletti

Universidade Federal de Itajubá
Av. B P S, 1303 - Pinheirinho, Itajubá - MG, 37500-903
brunogarletti@gmail.com

Fabiano Leal

Universidade Federal de Itajubá
Av. B P S, 1303 - Pinheirinho, Itajubá - MG, 37500-903
fleal@unifei.edu.br

RESUMO

A adoção de Simulação de Eventos Discretos (SED) em ambientes industriais requer rigor na documentação e tratamento de suposições (decisões sobre dados ausentes) e simplificações (abstrações deliberadas). Este estudo apresenta um protocolo de Pesquisa-Ação aplicado à linha de usinagem H01 de bronzinas em uma empresa situada em Itajubá, cidade no Sul de Minas Gerais. A modelagem conceitual em BPMN do fluxo real e do modelo em PROMODEL permitiu validar premissas junto a gestores. A abordagem resultou em maior transparência, confiança nos resultados e subsídios para propostas de melhoria incremental.

PALAVRAS CHAVE. Simulação de Eventos Discretos; BPMN; Suposições e Simplificações.

Tópicos: SIM – Simulação

ABSTRACT

The adoption of Discrete-Event Simulation (DES) in industrial settings demands rigor in documenting and handling assumptions (decisions regarding missing data) and simplifications (deliberate abstractions). This paper proposes an Action-Research protocol applied to the H01 machining line for bronze bush production at a Manufacturing located at Itajubá in South Minas Gerais. BPMN conceptual mapping of both the real process and the PROMODEL simulation enabled stakeholder validation of premises. The approach enhanced transparency, confidence in outcomes, and supported incremental improvement proposals.

KEYWORDS. Discrete-Event Simulation; BPMN; assumptions and simplifications.

Paper topics: SIM - Simulation

1. Introdução

A Simulação de Eventos Discretos (SED) consolidou-se como ferramenta essencial para análise e otimização de sistemas produtivos complexos (Law & Kelton, 2000). Contudo, a credibilidade dos resultados de SED depende diretamente do rigor com que são gerenciadas as premissas subjacentes ao modelo: **suposições** — decisões tomadas diante de dados ausentes ou imprecisos — e **simplificações** — escolhas deliberadas de abstração do sistema real (Robinson & Brooks, 2024).

A falta de transparência na documentação dessas premissas pode comprometer a confiança de usuários e tomadores de decisão, levando a interpretações equivocadas e decisões não embasadas. Pidd (1992) e Sargent (2013) ressaltam que modelos de simulação sem explicitação adequada de suposições inviabilizam processos de verificação e validação. Em parceria com organizações industriais, Robinson et al. (2018) demonstraram que o uso de notações gráficas familiares, como BPMN, pode auxiliar *stakeholders* a compreender e validar fluxos de simulação.

Este trabalho propõe um protocolo de Pesquisa-Ação que integra modelagem conceitual em BPMN e implementação em PROMODEL para gerir suposições e simplificações em SED. O protocolo foi testado na linha H01 de usinagem de bronzinas da Empresa M, empresa automotiva de grande porte localizada em Itajubá/MG. Nossa contribuição reside em:

- Fornecer diretrizes claras para documentação, avaliação e tratamento de suposições e simplificações;
- Integrar BPMN como ferramenta de validação colaborativa junto a gestores;
- Avaliar impactos de premissas críticas em um caso real de aplicação industrial.

Os resultados apontam para aumento significativo da confiança dos gestores no modelo de simulação e identificação mais precisa de gargalos e propostas de melhoria.

2. Revisão Bibliográfica

2.1 Modelagem Conceitual em SED

A etapa de modelagem conceitual define o escopo, objetivos e abstrações do sistema real, servindo de base para toda a simulação (Pidd, 1992). Law & Kelton (2000) descrevem a modelagem conceitual como um processo iterativo que envolve mapeamento de entidades, fluxos de informação e identificação de fontes de variabilidade. Sargent (2013) resalta que a clareza dos diagramas conceituais é crucial para a verificação (correção de erros de modelagem) e validação (comparação com dados reais).

A notação BPMN, originalmente criada para processos de negócio, tem sido adotada para modelagem conceitual em simulação (Tako & Robinson, 2015). BPMN oferece elementos gráficos intuitivos — eventos, atividades, gateways e artefatos — que facilitam o entendimento por *stakeholders* não técnicos, promovendo validação colaborativa e detecção precoce de suposições implícitas.

2.2 Suposições e Simplificações: Tipologia e Impactos

Suposições são decisões sobre pontos de incerteza no sistema real, por exemplo, a forma de distribuição de chegadas ou taxas de falhas. Simplificações referem-se à redução de complexidade estrutural, como agrupar várias estações em um único bloco ou usar médias de tempos de ciclo em vez de distribuições completas (Robinson & Brooks, 2024).

Nance et al. (2010) categorizaram simplificações em três tipos:

- Estruturais: agregação de entidades ou recursos;
- Comportamentais: omissão de dinâmicas, como sazonalidades;
- Paramétricas: uso de valores médios em vez de distribuições.

Cada categoria afeta indicadores de desempenho de maneiras distintas, demandando análise de sensibilidade específica. A documentação sistemática em planilhas e fluxos BPMN facilita a avaliação de confiabilidade (baixa/média/alta) e impacto (baixa/média/alta) de cada premissa (Robinson & Brooks, 2024).

2.3 Metodologias de Pesquisa-Ação em Engenharia de Produção

A Pesquisa-Ação (PA) une resolução de problemas práticos e geração de conhecimento científico por meio de ciclos de diagnóstico, ação e reflexão (Mello et al., 2012). Azevedo & Ensslin (2020) classificam a PA como método aplicado e qualitativo, com participação colaborativa do pesquisador e *stakeholders*.

Coghlan et al. (2014) destacam o ciclo de PA em três fases: (i) diagnóstico/plano de ação; (ii) execução da ação/coleta de dados; (iii) reflexão/replanejamento. McKay & Marshall (2001) apontam que a PA promove aprendizagem organizacional contínua, essencial para ambientes industriais dinâmicos.

3. Definição do Problema

Robinson & Brooks (2024) demonstraram a importância de distinguir suposições de simplificações e fornecer métodos práticos para gerenciá-las. No contexto industrial, a falta de clareza sobre essas premissas se traduz em resistência dos gestores e baixa confiança nos resultados de SED.

Este estudo teve como objetivo adaptar o framework de Robinson & Brooks para um contexto de produção de bronzinas na Empresa M, implementando um protocolo de PA que integrasse BPMN e PROMODEL. Os desafios incluíram:

- Identificar e categorizar suposições e simplificações relevantes no processo real;
- Mapear fluxos em BPMN de modo compreensível a gestores;
- Implementar modelo PROMODEL que refletisse as premissas mapeadas;
- Validar colaborativamente o modelo e avaliar impactos de premissas críticas.

4. Procedimento Metodológico e Classificação da Pesquisa

4.1 Classificação da Pesquisa

A pesquisa é de natureza aplicada, pois visa solucionar problema real de eficiência; possui objetivos descritivos-explicativos, descrevendo o protocolo e explicando sua eficácia; utiliza abordagem mista (quantitativa e qualitativa); e adota método de Pesquisa-Ação, com ciclos iterativos de participação de modeladores e gestores (Mello et al., 2012).

4.2 Protocolo de Pesquisa-Ação

1. Diagnóstico: definição de objetivos, escopo e indicadores; workshops para mapeamento preliminar.
2. Planejamento: listagem de suposições e simplificações em planilhas; elaboração de roteiro de entrevistas.
3. Ação: modelagem conceitual em BPMN; implementação do modelo em PROMODEL e execução de simulações.
4. Verificação & Validação: validação dos fluxos BPMN com *stakeholders*.
5. Reflexão & Comunicação: análise crítica dos resultados; refinamento do protocolo e documentação final.

5. Estudo de Caso: Linha de Usinagem H01 – Descrição do Processo

A linha H01 na Empresa M processa bronzinas para veículos pesados em três blocos:

- (i) Preparação,
- (ii) Usinagem,
- (iii) Acabamento.

Este é um procedimento com diversas etapas e nesta seção abordaremos a descrição do processo de maneira mais generalista com o intuito de contextualizar o leitor perante o processo produtivo.

Na preparação, pilhas com sete caixas de peças são elevadas e desembaralhadas em panela vibratória, neste processo ocorrem enrosocos ocasionais, os quais demandam de 1–2 min de intervenção manual.

Na usinagem, a chanfradeira processa duas peças por vez, sofrendo falhas médias de 18 min/dia. Em seguida, ocorre a etapa chamada de quebra canto (ciclo unitário), seguido pelas etapas de prensa ressalto (operação pulsada), fresa liga e estampa furo (sendo esta última etapa a que apresentam falhas mecânicas frequentes).

A fresa canal, etapa subsequente a estampa furo, requer troca de inserto a cada 1.000 peças (5 min) e alimenta o Poka Yoke, responsável pela inspeção automática de ressalto, furo e canal, com taxa de falso rejeito de 2 % seguida de retrabalho manual.

A rebarbadeira e a brochadeira realizam medições periódicas (5–10 min), sendo essas etapas as responsáveis por interrupção no fluxo.

Por fim, a última etapa da usinagem é a mandriladora, a qual apresenta um gargalo dinâmico (14–17 peças/min) e opera com buffer pós-brochadeira para mitigar falhas.

Este processo pode ser observado de maneira sequencial pela Tabela 1, onde são apresentados também os indicadores operacionais utilizados pela Empresa M em cada Etapa.

Tabela 1: Etapas, descrição e indicadores do Processo de Usinagem

Etapa	Descrição	Indicadores
Alimentação	Elevador e vibratória; enrosocos	tempo/freq. desenrosco (min/dia)
Chanfradeira	2 peças/vez; falhas médias	disponibilidade (%)
Quebra Canto	ciclo unitário; buffer 3–5 caixas	tempo de parada (s/dia)
Prensa Ressalto	operação pulsada	taxa de falhas (%)
Fresa Liga	fluxo constante	throughput (pç/min)
Estampa Furo	falhas mecânicas	MTTR/MTBF
Fresa Canal	troca inserto	tempo de parada (min/1.000 pç)
Poka Yoke	inspeção automática	taxa de rejeição/retrabalho (%)
Rebarbadeira/Broch.	medições e ajustes	frequência de paradas
Mandriladora	gargalo dinâmico	throughput & disponibilidade (%)

6. Fluxos BPMN

Esta seção apresenta dois fluxos BPMN detalhados, desenvolvidos para mapear o processo real da linha H01 e o modelo de simulação implementado no PROMODEL. O uso de BPMN visa tornar explícitas todas as etapas, gateways e eventos de exceção, aumentando a transparência das premissas.

6.1 BPMN do Processo Real (H01)

Para fins ilustrativos, deu-se início ao mapeamento do processo seguindo a notação BPMN de maneira manual e com atividades sequenciais, através de reuniões com os *stakeholders*. O resultado inicial pode ser observado abaixo através do Fluxo 01.

Fluxo 01 – Processo H01 – Mapeamento V1

Start Event: Ordem de produção recebida.

Task: Alimentação da Chanfradeira – elevador → panela vibratória.

Exclusive Gateway: Enrosco na panela vibratória?

(Sim → Task Desenroscos (1–2 min))

(Não → Task Chanfradeira)

Task: Chanfradeira

Sub-Process Usinagem: sequência contínua de atividades:

Task: Quebra Canto (ciclo unitário; buffer de 3–5 caixas em paradas)

Task: Prensa Ressalto (operação pulsada com menores taxas de falha)

Task: Fresa Liga (fluxo constante, calha quase sempre cheia)

Task: Estampa Furo (falhas mecânicas ocasionais)

Intermediate Timer Event: Parada para virar inserto a cada 1.000 peças (5 min)

Task: Fresa Canal

Task: Poka Yoke (inspeção automática de ressalto, furo e canal)

Exclusive Gateway: Rejeitado pelo Poka Yoke?

(Sim → Task Retrabalho Manual → retorna para Rebarbadeira);

(Não → Task Rebarbadeira)

Task: Rebarbadeira

Task: Brochadeira (medições periódicas a cada 5–10 min; até 5 peças)

Task: Mandriladora

Task: Ajuste Manual após medições fora de especificação (“olhômetro”).

Task: Embalagem e Expedição.

End Event: Pedidos concluídos.

Após a finalização do Fluxo 01, a qual ocorreu em uma primeira reunião do modelador junto aos *stakeholders*, com o intuito de realizar um alinhamento inicial sobre o procedimento, foi realizada uma nova reunião buscando um maior aprofundamento do processo, sendo que a entrega desta reunião foi um fluxo bem detalhada seguindo a notação BPMN conforme pode ser observado na Figura 1.

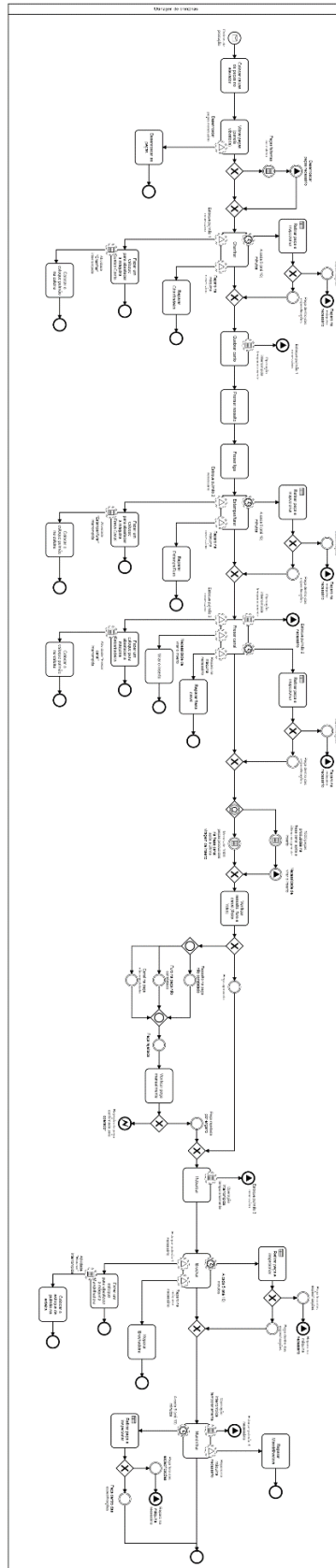


Figura 1: BPMN Fluxo Real H01

6.2 BPMN do Modelo de Simulação (PROMODEL)

Para a modelagem da simulação em PROMODEL tomou-se a mesma estratégia inicial. Foi apresentado um mapeamento do processo de maneira manual, com as atividades sequencias e suas estruturas definidas em reunião junto aos *stakeholders*. O resultado pode ser observado abaixo através do Fluxo 02.

Fluxo 02 – Processo H01 – Mapeamento V1 PROMODEL

Start Event: Início de réplica.

Pool & Lane: Buffer de Entrada – chegada de ordens via processo **Poisson**.

Sequence Linear de Tarefas com Boundary Events:

- **Task:** Chanfradeira (tempo fixo médio); **Boundary Event:** falha diária consolidada (18 min/dia).
 - **Task:** Quebra Canto; **Boundary Event:** parada média (33 s/dia).
 - **Task:** Prensa Ressalto.
 - **Task:** Fresa Liga.
 - **Task:** Estampa Furo.
 - **Task:** Fresa Canal; **Boundary Event:** turno de inserto a cada 1.000 peças.
 - **Task:** Poka Yoke; implementado como probabilidade fixa de falso rejeito.
 - **Task:** Rebarbadeira.
 - **Task:** Brochadeira; **Boundary Event:** paradas para medições MTTR/MTBF.
 - **Task:** Mandriladora; **Boundary Event:** paradas MTTR/MTBF. **Parallel Gateway:** buffers (250–1.000 peças) antes de Quebra Canto, Fresa Canal, Brochadeira e Mandriladora.
- End Event:** Término de réplica e coleta de indicadores.

Essa modelagem inicial foi utilizada para maior entendimento do modelador junto aos *stakeholders* sobre as suposições e simplificações que deveriam ocorrer para a simulação do processo de usinagem. Após validação o modelo foi implementado no PROMODEL.

7. Suposições e Simplificações para PROMODEL

Para comparação entre o processo real e o modelo de simulação, foram apresentadas as principais suposições e simplificações conforme Tabela 2.

As premissas descritas na Tabela 2 condizem com a notação BPMN dos fluxos real e PROMODEL. Elas destacam diferenças críticas que afetam diretamente os indicadores de desempenho.

Tabela 2: Suposições e Simplificações entre Processo Real e PROMODEL

Atividade	Tipo	Processo Real (BPMN)	Modelo PROMODEL (BPMN)
Chanfradeira	Suposição	enrosocos reais e variação estocástica	falha consolidada (18 min/dia)
Quebra Canto	Simplificação	buffer físico de 3–5 caixas	tempo médio de parada por dia (33 s)
Troca de inserto	Simplificação	evento a cada 1.000 peças (5 min)	boundary event no fluxo para inserto
Inspeções	Suposição	falso rejeito manual + retrabalho	probabilidade fixa de rejeição + 1 ciclo
Estoques tamponados	Simplificação	múltiplos buffers físicos (até 1.000 peças)	buffers modelados como capacidade fixa

8. Resultados

Durante a apresentação dos fluxos BPMN e dos resultados de simulação, o gestor da operação destacou:

- **Validação Colaborativa:** Pela primeira vez, utilizou BPMN — notação de seu domínio — para revisar o modelo de simulação, resultando em maior engajamento e compreensão das premissas.
- **Confiança Aumentada:** A clareza proporcionada pelo mapeamento BPMN permitiu aceitar os resultados do PROMODEL com mais segurança, alinhando expectativas sobre throughput e utilização de recursos.
- **Identificação de Gargalos:** Os elementos gráficos destacaram de forma inequívoca as atividades críticas (chanfradeira, fresa canal e brochadeira), orientando propostas de melhoria como ajuste de buffers e manutenção preditiva.
- **Comunicação Facilitada:** A linguagem BPMN serviu como ponte entre modeladores e stakeholders, acelerando a definição de cenários de sensibilidade e planos de ação.

9. Discussão

O uso integrado de BPMN e SED demonstrou ser efetivo em diversos aspectos:

- **Transparência:** Tornou explícitas as suposições e simplificações, reduzindo riscos de interpretações divergentes.
- **Colaboração:** Permitiu a participação ativa dos gestores, fortalecendo a apropriação do modelo.

- **Rigor Metodológico:** O protocolo de Pesquisa-Ação garantiu ciclos iterativos de diagnóstico, ação e reflexão, conforme (Coghlan et al., 2014).
- **Limitações:** O modelo PROMODEL não capturou completamente dinâmicas de transporte interno e mix de produtos, sugerindo necessidade de extensão para estudo multivariado.

Futuros trabalhos devem explorar integração em tempo real com sistemas MES e aplicação em outros setores industriais para generalizar a efetividade do protocolo.

10. Conclusões

Este estudo comprovou que a adoção de BPMN, aliada a um protocolo sistemático de suposições e simplificações, fortalece a confiança e a transparência em projetos de SED. Recomenda-se a aplicação dessa abordagem em diferentes contextos industriais para validar sua robustez e identificar nichos de maior impacto.

11. Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio da Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação (PRPPG-UNIFEI), da CAPES, do CNPq e da FAPEMIG.

Referências

- AZEVEDO, J. C.; ENSSLIN, S. R. Pesquisa-ação e produção científica: fundamentos e aplicações. Porto Alegre: UFRGS, 2020.
- BANKS, J. et al. Introdução à simulação de sistemas: modelagem e análise. 4. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 1998.
- COGHLAN, D.; BRADY, J. Doing action research in your organization. 4. ed. London: Sage, 2014.
- COUGHLAN, P.; COUGHLAN, P. Action research for operations management. *International Journal of Operations & Production Management*, v. 22, n. 2, p. 220–240, 2002.
- LAW, A. M.; KELTON, W. D. Simulation Modeling and Analysis. 3. ed. New York: McGraw-Hill, 2000.
- MELLO, C. H. P. et al. Pesquisa-ação em engenharia de produção: método e aplicação. São Paulo: Atlas, 2012.
- NANCE, R. E. et al. Classification of modeling errors in simulation models. *Proceedings of the 2010 Winter Simulation Conference*, 2010.
- PIDD, M. Computer simulation in management science. Chichester: Wiley, 1992.
- ROBINSON, S.; BROOKS, R. Assumptions and simplifications in discrete-event simulation modelling. *Journal of Simulation*, v. 18, n. 3, p. 210–228, 2024.

ROBERTS, S.; TAO, J. Using BPMN for simulation conceptual modeling: a systematic review. *Simulation Modelling Practice and Theory*, v. 98, p. 102012, 2019.

SARGENT, R. G. Verification and validation of simulation models. *Journal of Simulation*, v. 7, n. 1, p. 12–24, 2013.

TURRIONI, J. B.; MELLO, C. H. P. Ciclos de pesquisa-ação: teoria e prática. *Revista de Administração*, v. 45, n. 2, p. 101–115, 2010.